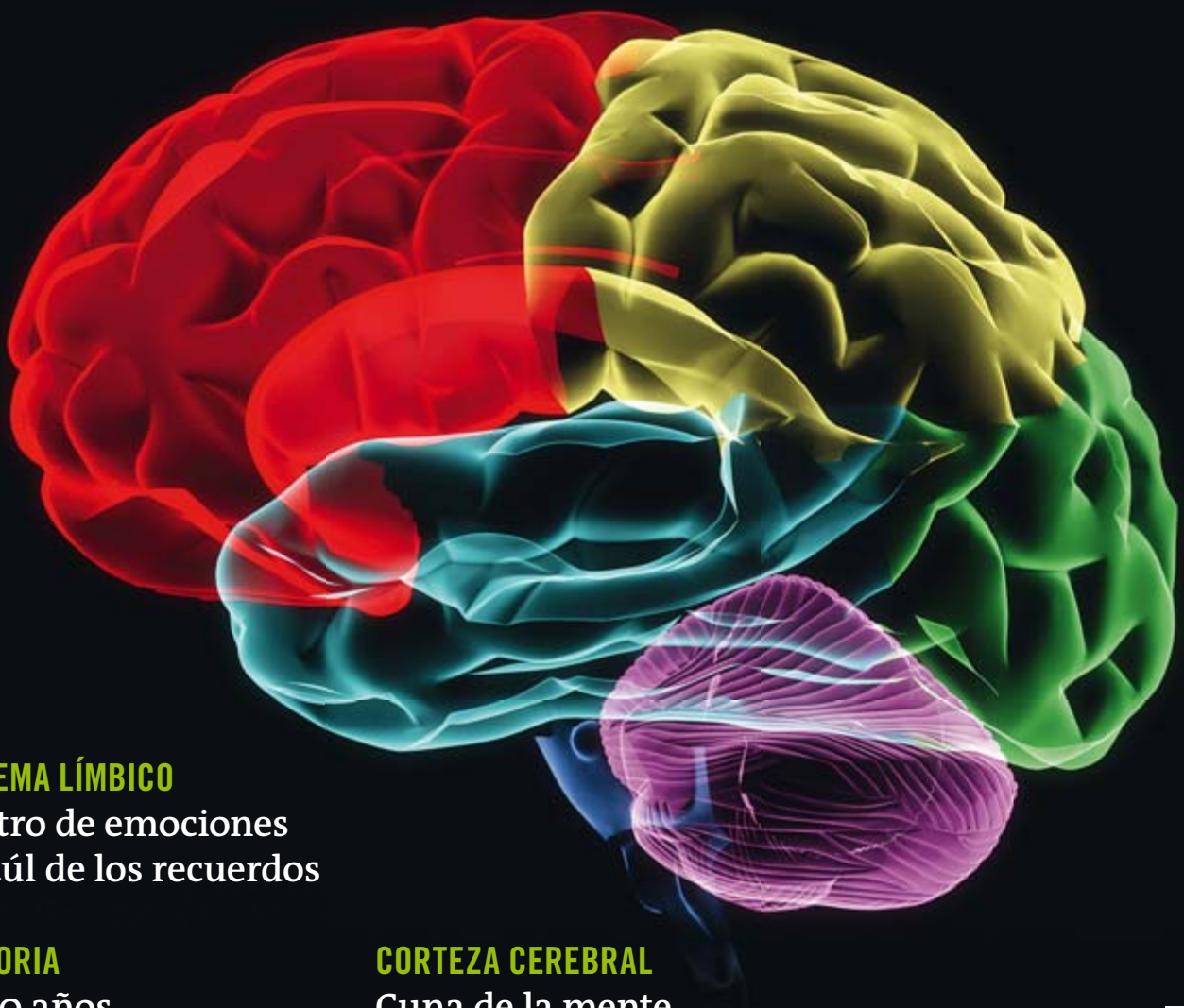
MENTE y CEREBRO
Cuadernos
N.º 1 - 2012
6,90 €
investigacionyciencia.es

EL CEREBRO

Estructura y funciones del sistema nervioso central



SISTEMA LÍMBICO
Centro de emociones
y baúl de los recuerdos

HISTORIA
7000 años
de neurociencia

CORTEZA CEREBRAL
Cuna de la mente
y la cultura

PERCEPCIÓN
Cuando las sensaciones
se hacen conscientes

MEMORIA OPERATIVA
El almacén temporal
de información

Cuadernos MENTE y CEREBRO
1er CUATRIMESTRE 2012

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

MENTE y CEREBRO

Suscríbase a la versión DIGITAL de INVESTIGACION Y CIENCIA y MENTE Y CEREBRO y acceda al contenido completo de todos los números (en pdf)*

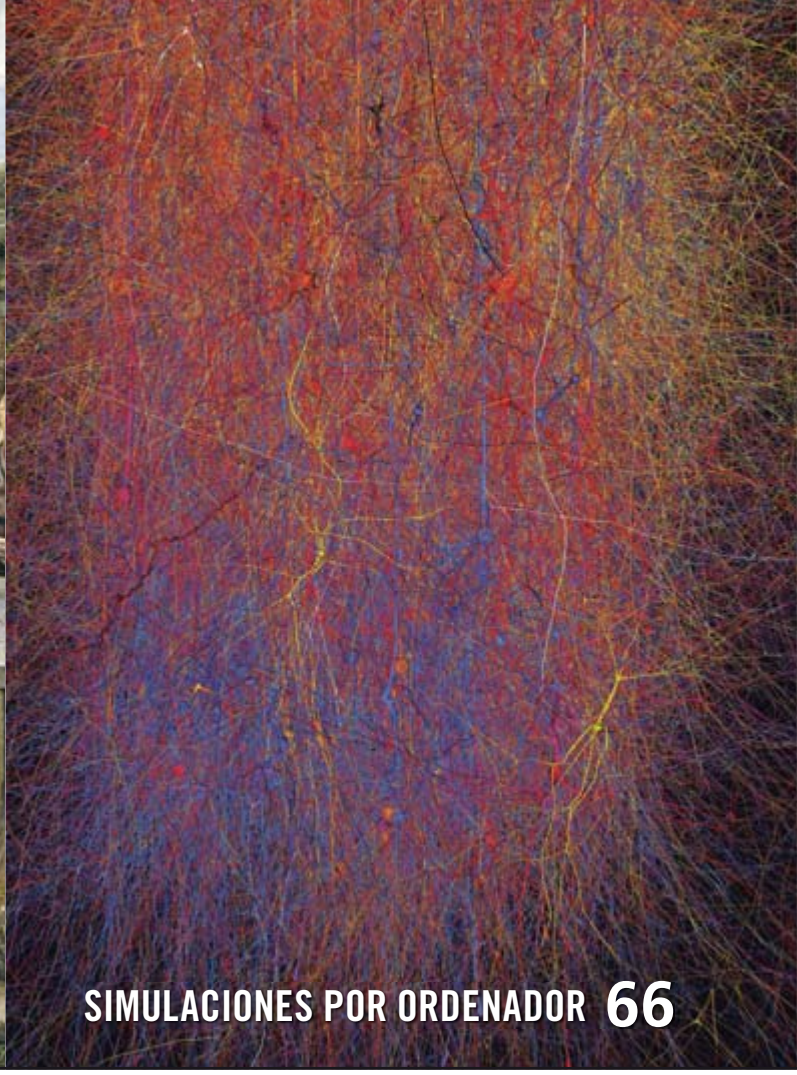
- Durante el período de suscripción, recibirá una notificación por correo electrónico informándole de la disponibilidad de la nueva revista
- Podrá acceder a los ejemplares en cualquier momento y lugar

* Ejemplares de IyC disponibles desde 1996 a la actualidad y el archivo completo de MyC

www.investigacionyciencia.es

SUMARIO

ORÍGENES DE LA NEUROLOGÍA 4



SIMULACIONES POR ORDENADOR 66

HISTORIA

4 DE LA TREPANACIÓN A LA TEORÍA DE LA NEURONA

Robert-Benjamin Illing

Hasta llegar al momento actual que viven las neurociencias, se ha recorrido un largo camino cuyos primeros pasos se dieron en tiempos prehistóricos.

14 DE LA CARTOGRAFÍA DEL CEREBRO AL ROBOT

Robert-Benjamin Illing

En el progreso de la historia de la investigación cerebral, ideas que se consideraban bien asentadas han dejado paso a otras más firmes.

22 HERÓFILO Y LA ANATOMÍA CEREBRAL

Helmut Wicht y Hartwig Hanser

Hace más de 2000 años, Herófilo de Calcedonia fundó la anatomía humana: describió, no con métodos remilgados, la arquitectura del cerebro humano.

ANATOMÍA

28 MÉDULA ESPINAL

Helmut Wicht

La médula espinal no solo es capaz de realizar funciones autónomas de importancia principal. Sin su colaboración, el cerebro quedaría totalmente aislado.

32 NUEVA CONSIDERACIÓN DE LOS NERVIOS

Helmut Wicht

Los hay en forma de cordones. A unos se les alteran, a otros se les tensan hasta la iracundia. Quien los tiene de acero, no los pierde con facilidad. ¿Qué son, en realidad, los nervios?

36 TALLO CEREBRAL

Helmut Wicht

El tronco encefálico actúa de nudo central de comunicaciones del sistema nervioso: conecta el cerebro con la médula espinal, el encéfalo con el cerebelo y, además, mantiene nuestro organismo en funcionamiento.

41 ESTRUCTURAS DEL DIENCÉFALO

Helmut Wicht

El diencéfalo designa la zona entre el tronco cerebral y el cerebro. Su núcleo, el tálamo, actúa de puerta de la conciencia. A menudo resulta caprichoso.

44 GANGLIOS BASALES

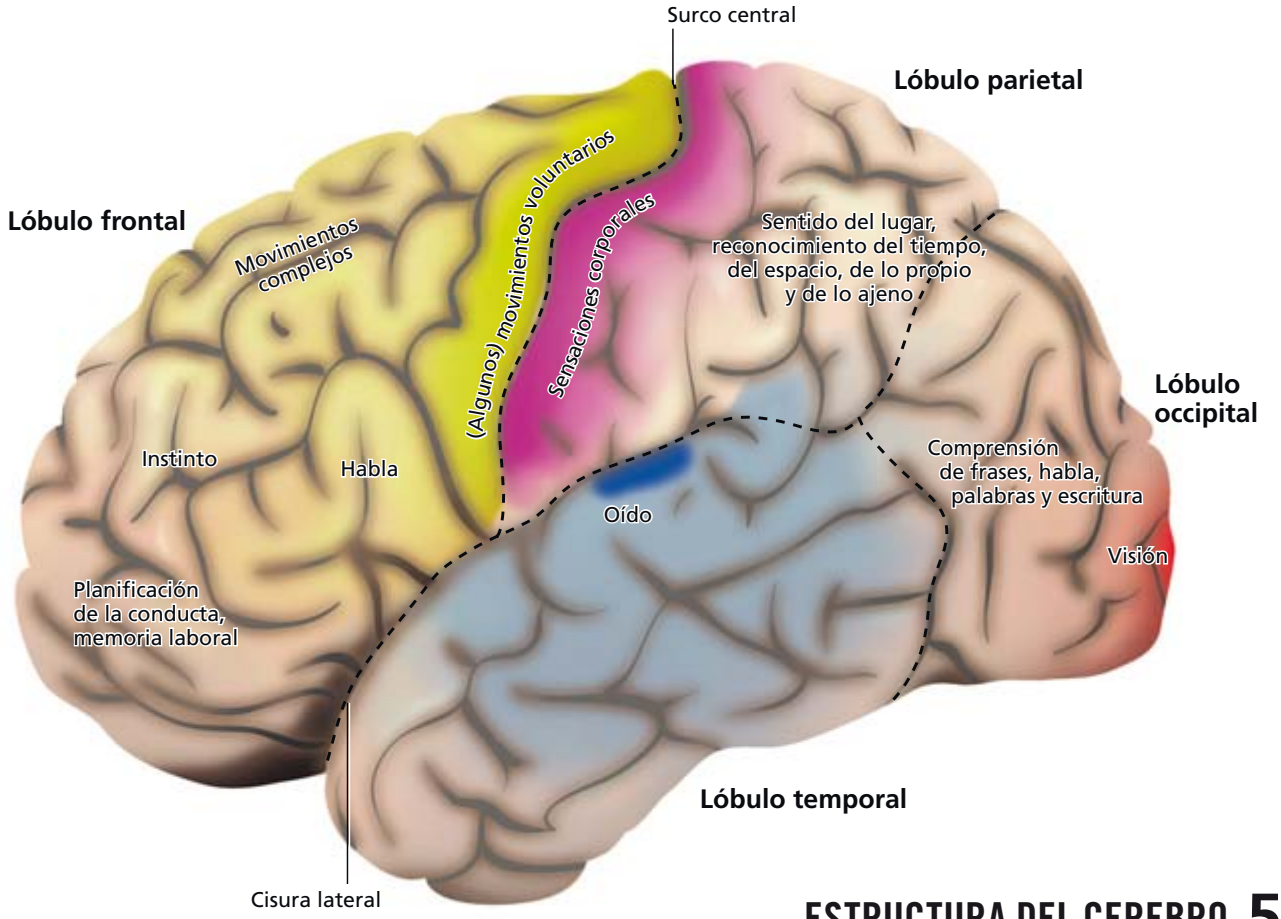
Helmut Wicht

Los ganglios basales controlan nuestro movimiento. Tarea que desempeña también la corteza motora. Los anatomistas resuelven esa aparente antinomia.

48 CIRCUITOS EN EL SISTEMA LÍMBICO

Helmut Wicht

Horno de emociones, diario de actividades y puerta al mundo de los olores, todo eso es el sistema límbico.



ESTRUCTURA DEL CEREBRO 54

FUNCIONES

51 ANATOMÍA DEL CEREBELO

Helmut Wicht

Compete al cerebelo la coordinación de los movimientos. Mas se desconocen los mecanismos subyacentes de esa y de otras de sus funciones.

54 CIRCUNVOLUCIONES CEREBRALES

Helmut Wicht

La corteza cerebral ocupa la mitad aproximada del volumen del cerebro. En ella tienen su sede nuestras funciones superiores.

58 EL HIPOCAMPO, UN ENIGMA POR RESOLVER

Helmut Wicht

Pese a que el hipocampo del cerebro debe su nombre al caballito de mar, poco se asemeja a dicho ser marino. Hoy en día esta región cerebral constituye una de las estructuras del encéfalo más investigadas.

66 SIMULACIÓN CEREBRAL

Felix Schürmann

Un equipo de investigación suizo está construyendo un cerebro artificial dentro de un supercomputador. Se trata del Blue Brain. Con él se proponen descifrar el funcionamiento del encéfalo.

72 TRAS LA PISTA DE LA CONCIENCIA

Christian Wolf

¿Qué sucede en el cerebro cuando percibimos de manera consciente? ¿Se activan áreas especializadas o se produce un trabajo conjunto de conexiones neuronales dispersas?

76 LA MELODÍA DE LAS CIRCUNVOLUCIONES

Charles T. Ambrose

A lo largo de la historia, los científicos han intentado descifrar el enigma eterno: la clave del talento. El cerebro de los pianistas podría albergar la respuesta.

82 RECUERDOS EFÍMEROS

Christian Wolf

Mantener por poco tiempo un número de teléfono en la cabeza, cocinar siguiendo una receta o jugar al Memory; nada de ello puede ejecutarse sin una memoria de trabajo en funcionamiento.

90 EL NECESARIO ESCEPTICISMO SOBRE LOS ESCÁNERES CEREBRALES

Michael Shermer

Las reproducciones en color nos han persuadido de que el cerebro funciona como una máquina modular. Tal simplificación es excesiva.

HISTORIA

De la trepanación a la teoría de la neurona

Hasta llegar al momento fascinante que viven las neurociencias contemporáneas, el hombre recorrió un largo camino de tanteos e hipótesis cuyos primeros pasos se dieron en tiempos prehistóricos

ROBERT-BENJAMIN ILLING

¿Qué pudo haber movido al *Homo sapiens* a ocuparse del interior de su cabeza? Los primeros testimonios que documentan este interés son sorprendentemente antiguos: tienen alrededor de 7000 años. Algunos cráneos procedentes de tumbas de la temprana Edad de Piedra muestran orificios provocados de intento: la resección de un trozo discoidal de hueso de la caja. Hubo trepanaciones hasta los tiempos modernos; presumiblemente, aunque en diferente medida, en todos los continentes. Su práctica estuvo extendida en muchas culturas de la Edad de Piedra, pero no gozó de igual difusión ni en las civilizaciones principales de la Antigüedad clásica ni en la Europa medieval.

La situación de las aberturas realizadas en estas operaciones no sigue ninguna regla estable, su diámetro varía entre uno y alrededor de cinco centímetros y, además, algunos de los cráneos conservados muestran varios agujeros. Algunos pacientes deben de haber sobrevivido a la intervención muchos años, dado que los bordes óseos están cicatrizados y, de forma sorprendente, numerosas trepanaciones, más de los dos tercios, cicatrizaron visiblemente bien. Un cierto número de operaciones guarda también relación con heridas craneales, pero no son, ni con mucho, la mayoría. Así, de la misma forma que determinados pueblos primitivos que han venido practicando la trepanación hasta los tiempos modernos, los hombres prehistóricos y de la Edad de Piedra creyeron probablemente en la existencia de unas causas sobrenaturales de la enfermedad, a las que personificaban como demonios. Mediante esos agujeros craneales se buscaba liberar al alma de malos espíritus, presuntos causantes de los vértigos recurrentes, de las convulsiones o de los ataques epilépticos o histéricos.

Por otro lado, numerosas culturas con niveles de desarrollo muy dispares han compartido la creencia en la existencia de un alma inmortal. En ese marco hemos de entender las circunstancias de los enterramientos y el equipamiento con que se dotaba a los muertos. Muy posiblemente ocurrió algo similar con los propios neandertales, extinguidos hace unos 27.000 años, quienes, al menos en algunos casos, incluían en las tumbas aditamentos que les sirvieran de ayuda para la vida del más allá.

Pese a la precocidad y notable extensión de la práctica de las trepanaciones, todo indica que

EXTIRPAR LA LOCURA

«La extracción de la piedra de la locura» de Jerónimo Bosch, *el Bosco* (1450-1516), muestra la extirpación de una «piedra de la locura», operación muy extendida en la Edad Media; según las creencias de la época, se curaba así la enfermedad mental.

WIKIMEDIA COMMONS / DOMINIO PÚBLICO

WIKIMEDIA COMMONS / MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE LAUSANNE / LICENCIA CC BY-SA 2.0

UN CRÁTER EN LA CABEZA
Cráneo humano procedente del neolítico trepanado con sílex. Los bordes cicatrizados del orificio indican que el paciente sobrevivió a la operación durante años.

a los filósofos y los médicos de la prehistoria y de la protohistoria les resultó menos tangible la significación del cerebro y del sistema nervioso que la de otros órganos internos. En la Biblia y en el Talmud encontramos observaciones médicas genuinas, pero ni una sola alusión que guarde relación con alguna afección del cerebro, de la médula espinal o de los nervios.

Los embalsamadores de los faraones y sacerdotes egipcios trataban con el mayor de los esmeros el hígado y el corazón; sin embargo, extraían el cerebro con varillas y cucharillas a través de la nariz y de las orejas. El primer apunte conocido sobre el cerebro se encuentra en el papiro Smith, llamado así en recuerdo de su descubridor, el egiptólogo norteamericano Edwin Smith (1822-1906). Este papiro egipcio procede de mediados del siglo XVI a. C., pero con toda probabilidad se trata de una copia de otro documento mucho más antiguo, cuyo autor fue posiblemente el arquitecto y médico Imhotep, que vivió alrededor del 2600 a. C. El papiro Smith describe, entre otras cosas, el diagnóstico, tratamiento y pronóstico de una serie de pacientes con heridas en la cabeza. Expone con sobriedad y orden sistemático los fenómenos acaecidos en los enfermos. Tras explicar las heridas abiertas sin fractura ósea, aborda las afecciones con fracturas craneales netas o conminutas, para considerar, por fin, algunos casos de lesiones de las cubiertas cerebrales. Con todo, como la práctica del embalsamamiento pone de manifiesto, todas estas observaciones no condujeron a una correcta valoración del funcionamiento del cerebro.

El deseo en el hígado, la inteligencia en el cerebro

En las culturas antiguas de Egipto y de Grecia correspondía al corazón la primacía entre los órganos. Aristóteles (384-322 a. C.) aducía sólidas razones:

- Una herida en el corazón conlleva la muerte inmediata, mientras que una herida cerebral acarrea, en la mayoría de los casos, consecuencias menos drásticas y puede incluso curarse por completo.
- Los cambios en el latido cardíaco se acompañan inequívocamente de modificaciones en el estado de ánimo. El cerebro, sin embargo, da la impresión de ser insensible, pues al tocarlo en un animal vivo no se despierta ningún tipo de reacción.

Por tanto, el movimiento del corazón parecía ser prácticamente equivalente a la vida misma. No obstante, solo el alma, esa imperecedera fuerza vital y formativa, tenía la potestad de dispensar la vida al organismo.

En contraposición con el Estagirita, Pitágoras (ca. 570-496 a. C.) e Hipócrates (ca. 460-370 a. C.), griegos como él, vieron en el cerebro la parte «más noble» del cuerpo humano. Opinión compartida por Platón (427-347 a. C.), quien distinguía tres partes en el alma. Relacionó cada una de ellas y sus respectivas potencias con un órgano determinado: las pasiones más bajas, como el deseo y la codicia, pertenecían al hígado; las superiores —por ejemplo, el orgullo, el valor, la furia o el miedo— al corazón. Pero el entendimiento competía al cerebro en exclusiva.

Galeno (ca. 130-200 d. C.), anatomista oriundo de Pérgamo, rebatió la doctrina aristotélica. Le incomodaba una afirmación en particular: la de que ni los ojos ni los oídos guardaban relación alguna con el cerebro. Los nervios óptico y auditivo, descubiertos por el propio Galeno, probaban justamente lo contrario. Nuestro médico observó que, tras un ataque apoplético, los sujetos podían perder la facultad perceptiva, aun cuando los órganos de los sentidos correspondientes no hubieran sufrido ninguna alteración. Demostrábase así que el cerebro era el órgano central de la percepción. Galeno quedó especialmente impresionado cuando observó los ventrículos cerebrales. Estas cavidades aparecían vacías en sus experimentos; pensaba que solo contenían algo cuya naturaleza semejaba la del aire. Pero cuando Galeno oprimía el ventrículo posterior del cerebro puesto al descubierto de un animal vivo, este caía en un estado de rigidez y de profundo aletargamiento. Si llevaba a cabo una escisión profunda en ese ventrículo, el animal no se recuperaba ya de la rigidez. Si solo realizaba una escisión superficial de la cubierta ventricular, el animal parpadeaba. Si oprimía ahora sobre uno de los ventrículos anteriores, el parpadeo cesaba y el ojo del lado oprimido recordaba al de un ciego. De todo ello infirió que las lesiones cerebrales solo afectaban la capacidad de percepción y de movimiento cuando concernían a los ventrículos. Además, debía de existir una especial relación entre las cavidades del tejido cerebral y el alma; en efecto, por un lado, los ventrículos eran estructuras importantes del cerebro que tenían una conexión directa con los órganos de los sentidos y, por otro, su contenido presumiblemente aéreo, dada su carencia de sustancia, no podía por menos que estar más próximo al alma que el tejido cerebral. El contenido ventricular quedó asimilado al pneuma, concebido por la filosofía griega como hálito, emanado del cosmos y mediador entre el cuerpo y el alma.

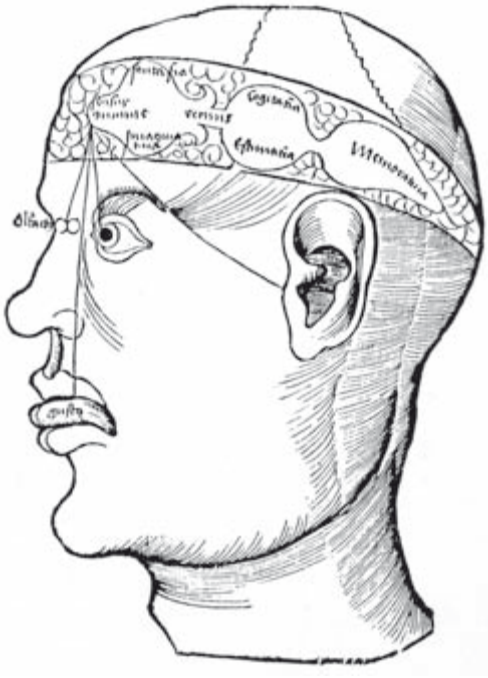
UNO DESPUÉS DE OTRO

Según la doctrina de las cámaras, desde la lengua, la nariz, los ojos y los oídos se dirigirían una serie de conexiones a la primera cámara (ventrículo), que era la sede del sentido común (*sensus communis*), de la facultad de percepción (*fantasia*) y de la facultad de representación (*vis imaginativa*). En la segunda cámara se alojarían la facultad del pensamiento (*vis cogitativa*) y la facultad del juicio (*vis estimativa*). En la tercera y más posterior de las cámaras se encontraría la facultad retentiva (*vis memorativa*).

El cerebro, una especie de pozo romano

Galeno también creyó ver que tanto los nervios que partían del cerebro como los que allí llegaban iban a parar a los ventrículos. El presocrático Alcmeón de Crotona (ca. 570-500 a. C.) había postulado ya que los nervios estaban huecos. En concordancia con ello, Galeno observó que el nervio óptico parecía efectivamente hueco, pues por su centro transcurría a menudo un vaso sanguíneo. Surgió así la idea de que los nervios, lo mismo que los vasos sanguíneos, constituían una suerte de sistema canalicular. Lo cual hizo al de Pérgamo suponer, a su vez, que los movimientos de los músculos y las expresiones de las emociones anímicas en los animales y en el hombre partían de los ventrículos, a cuyo volátil contenido dio el nombre de espíritu vital (*spiritus animalis*). Desde entonces, y durante siglos, la concepción galénica de la existencia y el efecto del *spiritus animalis* en el organismo vivo estuvo vigente como doctrina irrefutable.

Con pausada lentitud se fue completando la teoría galénica merced a las contribuciones de épocas posteriores. En la Edad Media se designaron también los ventrículos galénicos con el nombre de cámaras. Se les asignaron diferentes funciones: al ventrículo anterior le incumbía la percepción, al segundo (o medio) le correspondía el pensamiento, y al posterior, la memoria. A partir de aquí, mediante el flujo del *spiritus animalis* de delante hacia atrás, quedó pergeñada una secuencia plausible de los fenómenos anímicos. En ese marco teórico se desarrolla la doctrina de las cámaras.



TOMADO DE GREGOR REISCH: *MARGARITA PHILOSOPHICA*. BASILEA, 1517

RESUMEN

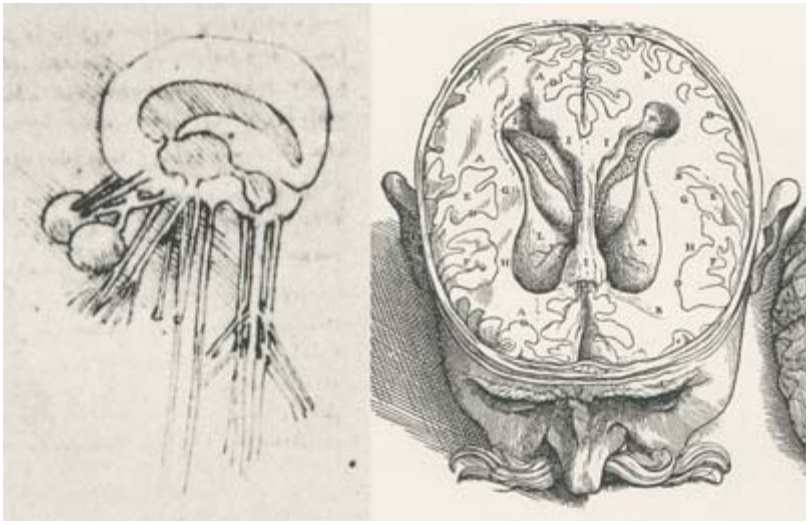
De los agujeros al microscopio

1 Ya en la prehistoria y Edad de Piedra se agujereaba el cráneo de los individuos que presentaban ataques epilépticos o histéricos con el fin de liberarlos del *espíritu maligno*.

2 A lo largo de la Edad Media se desarrolló la doctrina de Galeno basada en las «cámaras» cerebrales. A partir de los ventrículos galénicos se multiplicó el número de cámaras que debían conformar el cerebro.

3 Es a finales del siglo XIX y mediados del XX cuando convergen los hallazgos que facilitarán el estudio del funcionamiento neuronal.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 1



VENTRÍCULOS CEREBRALES DE DA VINCI Y VESALIO
Primeras representaciones anatómicamente correctas de los ventrículos cerebrales, una dibujada por Leonardo da Vinci (a la izquierda, representados en sección lateral, conjuntamente con los globos oculares y los nervios cerebrales, ca. 1504) y otra por Andrés Vesalio (a la derecha, en sección frontal superior, 1543).

Los médicos de la época ilustraron el modelo cameral con la imagen de un pozo romano. De la misma manera que el agua fluye allí de pileta en pileta, adoptando con ello nuevas formas, el s*piritus animalis* discurriría a través de los ventrículos cambiando su cualidad con el tránsito de uno a otro. Tal fue presumiblemente el primer bosquejo, todavía muy vacilante, de un modelo de la función cerebral.

La doctrina cameral fue desarrollada ulteriormente durante la Baja Edad Media. El número de cámaras se multiplicó. Algunos dibujos muestran diez e incluso más ventrículos. Con el transcurso del tiempo se diferenciaron distintas cualidades mentales y se otorgó a cada una de ellas una localización específica dentro de las cavidades cerebrales. Por el contrario, las investigaciones experimentales de los órganos cerebrales y sus ventrículos apenas despertaron algún interés. La doctrina cristiana dominante por doquier veía en el cuerpo humano un receptáculo pasajero del alma inmortal; durante largo tiempo estuvo prohibida la investigación anatómica en el hombre.

Con el Renacimiento se suscitó un renovado interés por el cuerpo humano, cuyo origen se halla en el arte elaborado en la península itálica. Leonardo da Vinci (1452-1519) y Miguel Ángel (1475-1564), sobre todo, intentaron adquirir un mejor conocimiento del cuerpo humano mirando en su interior. Leonardo realizó, de hecho, el primer dibujo realista que conocemos de los ventrículos cerebrales. A mediados del siglo XVI, el anatomista belga Andrés Vesalio (1514-1564) dio nuevo esplendor a la ciencia anatómica. Llevó a cabo numerosas disecciones públicas en los anfiteatros, poniendo sumo cuidado en la minuciosa preparación y presentación del cerebro. Mantuvo, sin embargo, una actitud reservada en relación con las especulaciones al uso sobre su funcionamiento.

El espíritu, ese sutil soplo de viento

René Descartes (1596-1650) dejó de lado tales reservas. El matemático y filósofo francés se esforzó por comprender el funcionamiento de los nervios y afirmó que las partes visibles del cerebro no tenían nada que ver con su forma de operar. Su doctrina se basó también en la aceptación de un *spiritus animalis* circulante, así como en la observación de las cavidades cerebrales y de los nervios supuestamente huecos.

Descartes conocía los novedosos estudios de su contemporáneo Galileo Galilei (1564-1642). Influenciado por ellos, formuló consecuentemente sus ideas en un contexto mecanicista, cambiando con ello de manera sustancial el carácter de la investigación sobre el cerebro. Concibió el *spiritus animalis* como un sutil soplo de viento que corría a través de los canalículos nerviosos o como unas llamas activas. Según Descartes, las corrientes de *spiritus animalis* vendrían desde los nervios sensitivos y se verterían en los ventrículos. Alcanzarían entonces un órgano central del cerebro, la glándula pineal, que se halla en ellos y está rodeada por el *spiritus animalis*. En la glándula pineal se concitarían, así, el cuerpo de naturaleza mecánica (*res extensa*) con el alma inmaterial e imperecedera (*res cogitans*). Los impulsos volitivos del alma originarían, por su parte, una corriente de *spiritus animalis* en los ventrículos y en la glándula pineal que se dirigiría por los respectivos nervios motores hacia los músculos. Una serie de finos filamentos en el interior de los canalículos nerviosos actuarían a modo de válvulas, cuyo movimiento guiaría la corriente de *spiritus animalis*. De esta manera, según Descartes, sentimos, por ejemplo, el calor y nos apartamos de forma refleja cuando este resulta excesivo.

Descartes tenía muy claro que un sistema mecanicista que pretendiera dar cuenta del inmenso número de fenómenos sensoriales y motores de naturaleza tan dispar había de ser complejo en extremo. La imagen del pozo romano no le parecía convincente, por lo que presentó un nuevo modelo de funcionamiento cerebral: el órgano. La caja de aire se correspondería con el corazón y las arterias, que, por vía sanguínea, llevaría el *spiritus animalis* a los ventrículos. El registro, con el que el organista decide por qué canales debe dirigirse el aire, equivaldría a las válvulas de los nervios, con cuya ayuda el *spiritus animalis* circula por los

tubos apropiados. La música que sale de los tubos vendría a ser la conducta razonable y coordinada que desarrollamos cuando ponemos nuestros músculos en movimiento y actuamos. Este nuevo modelo de funcionamiento cerebral era genial, pues proponía, tanto para la música del órgano como para el sistema nervioso, un orden complejo y armónico de múltiples actividades individuales.

Un experimento decisivo sobre el carácter líquido del espíritu vital

Descartes ofreció una imagen mecanicista del flujo de *spiritus animalis* a través de los ventrículos y los nervios tan firme y precisa que no resulta extraño que su teoría del funcionamiento nervioso se quisiera comprobar experimentalmente. En esa onda, Giovanni Borelli (1608-1679), médico y matemático, se propuso determinar si la materia que transitaba por el interior de los nervios hacia los músculos era volátil o líquida. Introdujo un animal vivo bajo el agua, que luchó lógicamente con todas sus fuerzas para no ahogarse. Conforme a la teoría, el *spiritus animalis* debía haber afluido copiosamente en los músculos estimulados. Tras algunos segundos, Borelli realizó una incisión en un músculo del animal muerto todavía sumergido. Pero, dado que no ascendió ninguna burbuja a la superficie del agua, concluyó que la naturaleza del espíritu vital era acuosa, no gaseosa: un *succus nerveus* (el «succo nérveo» de los textos españoles que recogieron la idea).

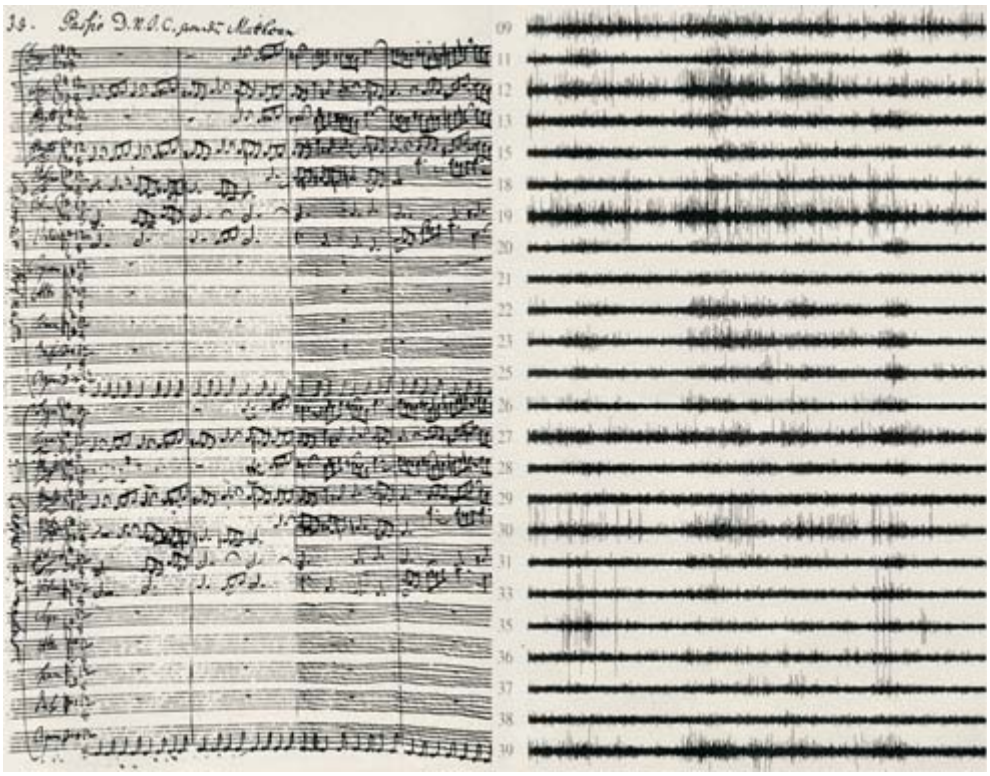
De acuerdo con la teoría cartesiana, el *spiritus animalis* se bombeaba desde el cerebro hasta el músculo que se iba a contraer. Consecuentemente, el volumen muscular debía de aumentar en el momento de la contracción. El médico holandés Jan Swammerdam (1637-1680) colocó una preparación nervo-muscular en un recipiente cerrado; presentaba este una parte superior en forma de fino tubo alargado en cuyo interior se encontraba suspendida una gota de agua. Tiraba entonces de un hilo de plata que atravesaba el cierre inferior del receptáculo y que acababa en el nervio, causando así que el músculo se contrajera. En el caso de que el músculo aumentara de tamaño al contraerse, la gota situada en la parte superior debería modificar su posición. Pero se quedó donde estaba. Este experimento, realizado antes del descubrimiento del principio de la conservación del volumen, debió de verse como una clara refutación de la teoría cartesiana.

Alexander Monro (1697-1767) intentó desvelar el movimiento del *spiritus animalis* con una serie de experimentos sucesivos. Este anatomista escocés realizó cortes transversales de los nervios, pero no encontró en ellos ninguna cavidad. Seccionó los nervios de animales vivos, sin ver salir ningún *succus nerveus* del lugar de la incisión. Ligó los nervios a fin de provocar que el *spritus animalis* que fluía por ellos se acumulara en el lado de la barrera más próximo al cerebro, ocasionando de paso una inflamación local de los nervios. Pero tampoco esto se verificó. A Monro le pareció muy improbable que un fluido nervioso de esta índole pudiera desplazarse por unos canales tan finos con la velocidad requerida para cumplir su cometido, en la hipótesis de que los nervios fueran huecos. De este problema se ocupó también Isaac Newton (1643-1727), quien sabía que un gas o un fluido no podían moverse con la rapidez necesaria a través de unos túbulos del calibre de los nervios. Por eso pensó que sería la vibración de

LA CONDUCCIÓN DEL ESTÍMULO SENSORIAL SEGÚN DESCARTES

El calor del fuego provoca un movimiento de la piel y, con ello, el tirón de unas finas fibras que abre los poros para el paso del *spiritus animalis*; discurre este hacia los ventrículos cerebrales y se transforma allí en una sensación.

TOMADO DE R. DESCARTES, *TRAITÉ DE L'HOMME*. PARÍS, 1664



HOJA DE PARTITURA DE «LA PASIÓN SEGÚN SAN MATEO» (1729) DE JOHANN SEBASTIAN BACH (1685-1750). REGISTRO PARCIAL DE LA ACTIVIDAD DE 24 NEURONAS DE LA CORTEZA CEREBRAL: J. KRÜGER, UNIVERSIDAD DE FRIBURGO

NEURONAS Y MÚSICA
La comparación cartesiana de la música polifónica con el rendimiento del cerebro resultó extraordinariamente esclarecedora. De la misma manera que la música depende del acorde temporalmente preciso de las distintas voces (a la izquierda, intervalo de 1,5 segundos), de las actividades individuales de las células nerviosas (a la derecha, intervalo de 1,5 segundos) depende la percepción diferenciada y el comportamiento coordinado.

los filamentos contenidos en los nervios lo que asumía la función del *spiritus*.

Los resultados a que se llegaba eran a todas luces contradictorios. Circularon informes que atestiguaban haber obtenido algo fluido de las secciones de los nervios. Se afirmó posteriormente que la carencia de inflamación en la ligadura nerviosa debíase a la falta de actividad funcional de esos nervios por los que no fluía ya ninguna sustancia. El propio Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) creyó haber visto en su microscopio que los nervios estaban realmente huecos. Fruto de esa general inquietud experimental, a mediados del siglo XVIII se había extendido una creciente curiosidad acerca de la cuestión básica: ¿cómo explicar, al menos en sus grandes líneas, la función del cerebro y de sus nervios?

La corriente del nervio ciático

Coincidió ese estado de ánimo con la aparición de un fenómeno del que todos hablaban, lo mismo en el laboratorio que en las ferias populares: la electricidad. No tardaron en avanzarse propuestas que identificaban la electricidad con ese medio que fluía por los nervios. Una tesis que no pudo imponerse en un principio debido a una razón de peso, a saber, la de que los nervios no parecían estar aislados. Al faltar tal aislamiento, en el supuesto de que hubiera en el organismo una fuente eléctrica, la corriente se propagaría hacia cualquier lado y no necesariamente a lo largo de las vías nerviosas destinadas a dicho fin.

La discusión acerca del papel de los fenómenos eléctricos en el sistema nervioso recibió un impulso esencial gracias a Luigi Galvani (1737-1798). En una de sus legendarias preparaciones de ancas de rana, puso una banda de zinc al nervio ciático y conectó este con el músculo mediante una abrazadera de plata. Siempre que cerraba el circuito y descargaba corriente, el músculo se contraía. Pero el hecho de que el nervio fuera excitable eléctricamente no probaba todavía que el *spiritus animalis* fuese lo mismo que la electricidad. Al fin y al cabo, los nervios también se pueden estimular mediante acciones mecánicas, como la empleada por Swammerdam, o químicas. Por eso Galvani no pudo rebatir la objeción que le hizo su compatriota Alessandro Volta (1745-1827): su experimento dejaba abierta la cuestión de la identidad entre la electricidad y el *spiritus animalis*. Solo más adelante un colega de este, Carlo Matteucci (1811-1868), pudo determinar las corrientes de un músculo mediante un aparato de medida dotado de suficiente sensibilidad.

Hasta que, en 1843, Emil Du Bois-Reymond (1818-1896) describió, por fin, la corriente que recorre los nervios tras un estímulo eléctrico. Cuando el fisiólogo alemán observó en 1849 que dicha corriente se producía también mediante

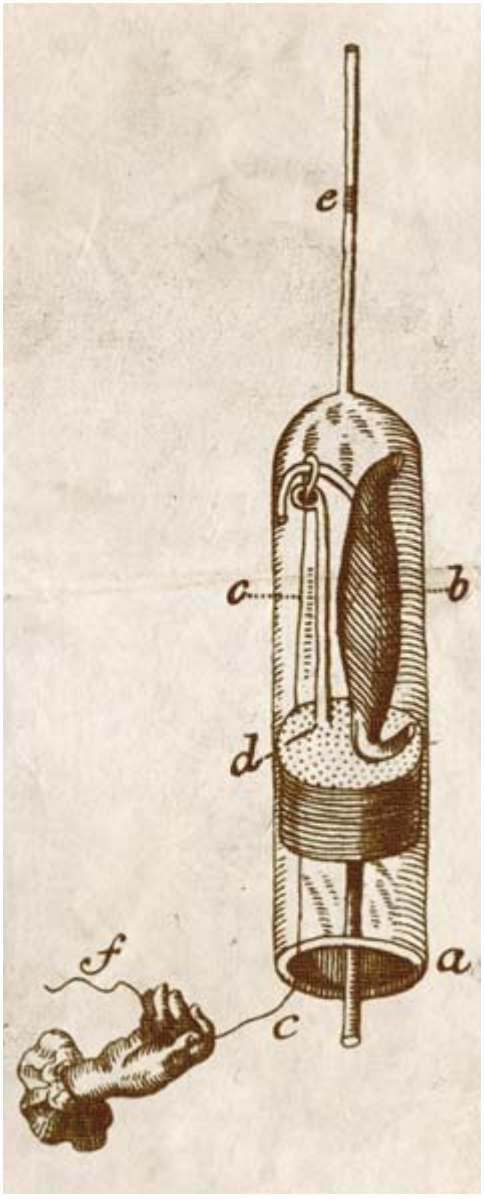
un estímulo químico, se obtuvo la prueba de que los nervios no eran meros conductores pasivos de la electricidad, sino que se mostraban también activos desde el punto de vista electromotor.

La imagen del nervio hueco pasó al archivo de la historia. El primer bosquejo del impulso eléctrico en una célula —hoy conocido como potencial de acción— lo pergeñaron en 1939 dos biofísicos ingleses, Alan Hodgkin y Andrew Huxley. El potencial de acción se reveló como una forma universal de señalización de las células nerviosas en todo el reino animal.

Ahora bien, dadas las limitaciones de los instrumentos de que se disponía alrededor de 1800, la cuestión sobre la composición y la estructura del tejido por el cual circulaban las corrientes nerviosas permaneció todavía sin dilucidar. El microscopio óptico adolecía por ese tiempo de importantes aberraciones. Bastaba un vistazo a través del microscopio para dejar convencidos a muchos científicos de entonces de que era algo completamente inservible. A lo largo del siglo XIX se consiguió reducir las aberraciones de la óptica microscópica, y el microscopio se convirtió en el instrumento imprescindible de la investigación neurobiológica, franqueándose una nueva vía de acceso a las permanentes cuestiones que habían venido preocupando a los científicos.

Un desarrollo semejante experimentaron las preparaciones microscópicas de las muestras tisulares. Los primeros pasos acertados para la fijación y tinción del tejido nervioso no se dieron hasta la segunda mitad del siglo XIX. Otto Deiters (1834-1863) fijó pequeñas muestras de tejido nervioso con ácido crómico y dicromato potásico. Con la ayuda de este tratamiento previo, el anatomista alemán pudo ver que del cuerpo de la célula nerviosa salían dos tipos de prolongaciones filamentosas: las «prolongaciones protoplásmicas», hoy llamadas dendritas, y el «cilindroeje» o axón. Para este tipo de células, su compatriota y colega Wilhelm von Waldeyer-Hartz (1836-1921) propuso en 1891 el nombre de neurona. En tiempo de Deiters era imposible hacer visibles las finas terminaciones de las neuronas. Es cierto que, con anterioridad, Joseph von Gerlach (1820-1896) había introducido ya el carmín, el añil y el cloruro de oro como los primeros medios de tinción para la investigación del tejido nervioso. Pero en la imagen microscópica se seguían perdiendo las terminaciones del axón y de las dendritas en las partes vecinas del preparado tisular que no estaban teñidas. Quedaba así sin poderse aclarar la cuestión sobre cómo se conectaban entre sí estas prolongaciones. En un principio, además, esta pregunta parecía no tener excesiva importancia, pues la hipótesis más simple y más probable era que las prolongaciones trenzaban una red compleja, un retículo. ¿Cómo podría imaginarse de otra manera la propagación de las señales a través del tejido nervioso, independientemente de que se pensara en un *spiritus animalis* o en la corriente eléctrica como medio transmisor?

Mientras los científicos estaban concentrados en el conocimiento de la estructura del tejido nervioso, acaecieron una serie de progresos en la preparación de las muestras. Se produjo un avance espectacular cuando Camilo Golgi (1843-1926), en la década de los setenta del siglo XIX, descubrió la reacción negra, hoy



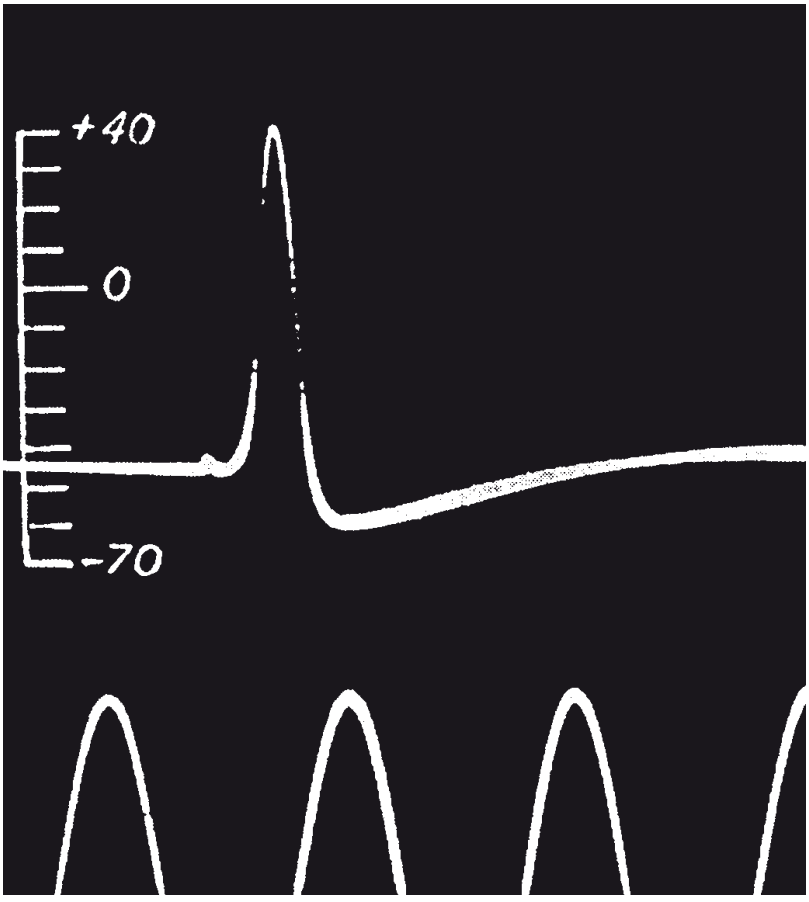
TOMADO DE J. SWAMMERDAM, *BIBLIA NATURAE*. LEIDEN, 1738

EL MÚSCULO EN EL TUBO
En este experimento de Jan Swammerdam se contrae, en un receptáculo cerrado (*a*), el músculo (*b*) a consecuencia de la estimulación de su nervio mediante un tirón dado a un hilo de plata (*c*). El hilo sale del receptáculo atravesando el cierre (*d*) de su parte inferior. La gota de agua (*e*) permanece inmóvil durante la contracción muscular.

denominada en su honor tinción de Golgi. A Santiago Ramón y Cajal (1852-1934), observando al microscopio cortes cerebrales con esta tinción, le llamó la atención el hecho de que en determinadas regiones siempre aparecieran formas celulares semejantes. La regularidad y el aislamiento de dichas formas no casaban con la idea de una red continua en la que no debía existir ninguna separación natural entre las distintas células nerviosas. Ramón y Cajal hizo un segundo descubrimiento fundamental. Comprobó que en la parte terminal de los axones teñidos se formaban a menudo unos engrosamientos peculiares, los llamados botones terminales. De todo ello dedujo Cajal que no había ninguna red nerviosa continua, sino que cada célula nerviosa era un individuo con límites perfectamente definidos. La teoría neuronal había nacido.

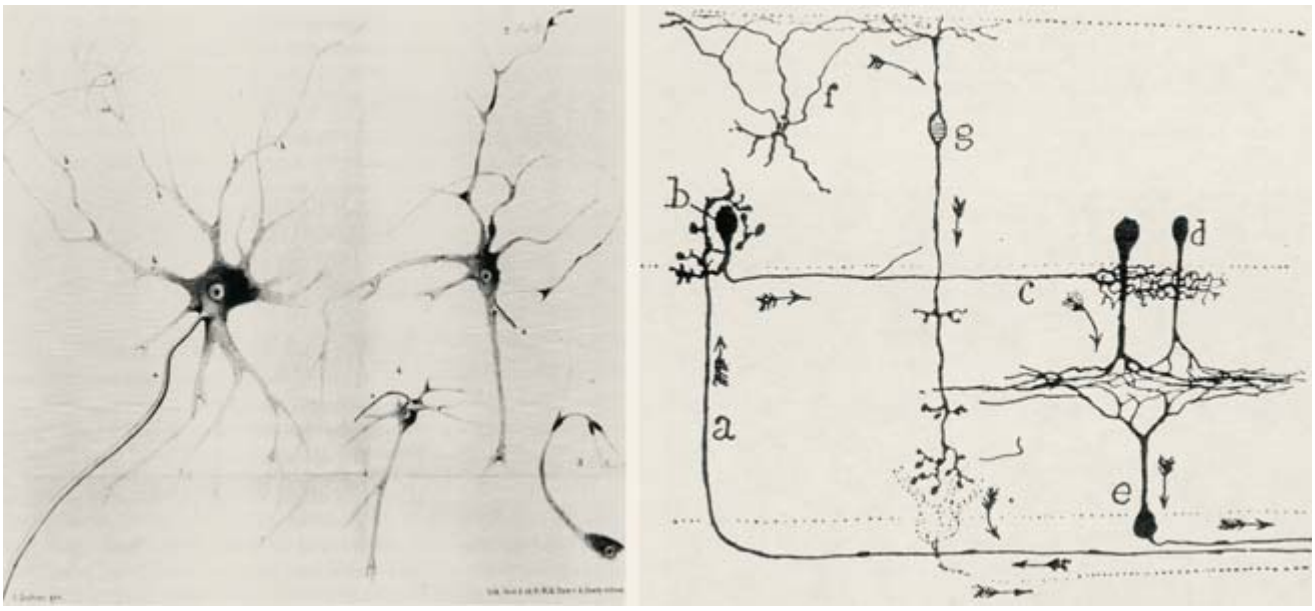
Pese a que la cuestión de la transmisión de la excitación de neurona a neurona distaba todavía de estar aclarada, Ramón y Cajal se mantuvo en sus trece en relación con la teoría neuronal. Completó muchos de sus dibujos de conexiones entre las células nerviosas realizados al microscopio con flechas que mostraban cómo, según su opinión, fluían las señales de una célula a otra. No podía concebirlo de otra manera, puesto que no se sospechaba que las células nerviosas podían ejercer diferentes efectos unas sobre otras. Aunque los experimentos de los hermanos Weber habían llamado la atención, ya a mediados del siglo XIX, sobre la existencia de efectos inhibidores en el sistema nervioso, el concepto de inhibición neuronal era por entonces todavía muy impreciso. Sería Charles Sherrington (1857-1952) quien, poco después de 1900, formulara definitivamente la idea de las células nerviosas inhibidoras y demostrara su existencia mediante métodos electrofisiológicos. En concordancia con el estado de las técnicas de las comunicaciones propias de su tiempo, el neurofisiólogo británico comparó el cerebro con una estación telegráfica. Ya en 1897 había dado el nombre de sinapsis al lugar de contacto entre células nerviosas. Sin embargo, hasta 1954, tras la introducción del microscopio electrónico, Sanford Palay y George Palade no pudieron corroborar experimentalmente que las neuronas eran individuos celulares con una estructura autónoma.

EL PRIMER BOSQUEJO DE UN POTENCIAL DE ACCIÓN INTRACELULAR
A la izquierda se recoge la fluctuación del potencial en milivolt; abajo se encuentran los marcadores temporales separados siempre 2 milisegundos uno de otro.



TOMADO DE: A. HODGKIN, A. HUXLEY: ACTION POTENTIALS RECORDED FROM INSIDE A NERVE FIBER. *NATURE*, 144, 1939

Pero la teoría neuronal seguía sin haber resuelto el problema del paso de las señales de una célula nerviosa a otra. ¿Cómo podía un impulso salvar la distancia entre dos neuronas? John Langley (1852-1925) depositó nicotina con un pincel fino sobre un músculo de rana aislado; observó que la nicotina desencadenaba una contracción muscular si se aplicaba en la sinapsis entre el nervio y el músculo. En otros lugares de la fibra muscular la nicotina parecía no ejercer dicho efecto. Langley descubrió todavía algo más: el tratamiento previo con un tóxico nervioso, el curare, hacía al músculo insensible a la nicotina, pero no impedía que la estimulación eléctrica directa lo activara. Langley concluyó, de tales resultados, que la nicotina actuaba en la superficie de la fibra muscular reaccionando a este nivel con un receptor, el cual también podía ser ocupado por el curare. La idea de que unos receptores moleculares de la célula podían fijar determinadas sustancias resultó fundamental para la neurofarmacología moderna. Langley supuso, además, que la fibra nerviosa estimulada liberaba en la sinapsis una sustancia similar a la nicotina que era la responsable del efecto sobre el músculo. Al químico alemán Otto Loewi



TOMADO DE O. DEITERS: *UNTERSUCHUNGEN ÜBER GEHIRN UND RÜCKENMARK DES MENSCHEN UND DER SÄUGETIERE* [INVESTIGACIONES SOBRE EL CEREBRO Y LA MÉDULA ESPINAL DEL HOMBRE Y DE LOS MAMÍFEROS]. VIEWEG, BRUNSWICK, 1865

TOMADO DE S. RAMÓN Y CAJAL: *TEXTURA DEL SISTEMA NERVIOSO DEL HOMBRE Y DE LOS VERTEBRADOS*. MOYA, MADRID, 1899-1904.

CÉLULAS NERVIOSAS Y SEÑALES NEURONALES SEGÚN RAMÓN Y CAJAL

La imagen de la izquierda muestra células nerviosas aisladas procedentes de la sustancia gris de la médula espinal de un buey, donde se diferenciaron por primera vez las dendritas de los axones. La ilustración a su derecha corresponde a un dibujo de Ramón y Cajal, en el que se representa la dirección seguida por las señales a través de los distintos tipos de neuronas de la retina de un ave. Las flechas indican la dirección del flujo de las señales, según suponía Ramón y Cajal.

(1873-1961) le cupo finalmente lograr la comprobación experimental de que los nervios estimulados (en este caso, el nervio vago del corazón) descargan una sustancia de la que depende el efecto nervioso. Henry Dale (1875-1968) descubrió que se trataba de un éster de la colina, la acetilcolina.

Células nerviosas que aprenden

La tesis de una transmisión química del impulso nervioso, tanto entre las neuronas entre sí como de las células nerviosas a las musculares, fue aceptada muy tardíamente por los neurocientíficos y solo tras la realización de una serie de observaciones básicas que vale la pena recordar. La primera, la de Bernhard Katz. Mostró que las terminaciones nerviosas liberaban sustancias indicadoras, los neurotransmisores, en dependencia de la actividad eléctrica. Estos transmisores moleculares se descargaban en paquetes. John Heuser y Thomas Reese comprobaron luego el mecanismo de constitución de tales *paquetes*: las vesículas de la terminación de las neuronas emisoras se contraían a consecuencia de la llegada de un potencial de acción a través de la membrana celular y pasaban su contenido, compuesto sobre todo por neurotransmisores, a la célula receptora. El que la célula emisora estimulara o inhibiera la célula receptora dependía del tipo de sustancia transmisora y de los receptores situados en la membrana de la célula postsináptica, a los cuales se fijaban los transmisores moleculares.

La comprobación de la existencia de sinapsis estimuladoras e inhibidoras alimentó la especulación acerca de la elaboración, por el sistema nervioso, de informaciones inteligentes siguiendo principios exactos y lógicos. Por otro lado, el psicólogo canadiense Donald Hebb (1904-1985) formuló en 1949 la hipótesis de que los lugares de contacto entre las células nerviosas podían cambiar en razón del tipo de actividad que ejercieran. Desde entonces, su hipótesis ha recibido múltiple confirmación experimental. La intensidad de la comunicación entre dos neuronas no queda determinada de una vez para siempre, sino que es modificable a través de la experiencia. Las células nerviosas pueden, pues, aprender. Una nueva hipótesis del funcionamiento cerebral, el modelo técnico, se deja ya entrever.

Robert-Benjamin Illing *comparte su interés por la historia de la ciencia con la docencia y el ejercicio de su especialidad neurológica en el Hospital Clínico Universitario de Friburgo.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

EL PUNTO DE PARTIDA DE LA OBRA NEUROHISTOLÓGICA DE CAJAL. J. M. López Piñero en *Mente y Cerebro*, n.º 1, págs. 6-7, 2002.

SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL. CIEN AÑOS DESPUÉS. Antoni Gamundí y Alberto Ferrús. Pirámide, Universitat de les Illes Balears, 2006.

GALENO DE PÉRGAMON (CA. 130-200). J. M. López Piñero en *Mente y Cerebro*, n.º 22. págs. 8-11, 2007.

HISTORIA

De la cartografía del cerebro **al robot**

En el progreso de la historia de la investigación cerebral se confirma que, también aquí, ideas que se consideraban bien asentadas se sustituyeron por otras más firmes

ROBERT-BENJAMIN ILLING

El pensamiento del hombre va unido inseparablemente a su cerebro. Lo han puesto de relieve, desde hace siglos, numerosas observaciones realizadas en enfermos y heridos. Pero ¿qué es exactamente lo que capacita a ese órgano para llevar a cabo su función? ¿Se trata de algún tipo de peculiaridad de las neuronas o radica el pensamiento en la forma en la que el cerebro está organizado y en cómo sus células «hablan» entre sí?

Debemos a Thomas Willis (1621-1675) el primer intento de clasificar las regiones cerebrales según sus funciones. En su obra, que ejerció un gran influjo, el médico inglés consideró que las circunvoluciones cerebrales eran la sede de la memoria y, a su vez, la sustancia blanca del interior del cerebro, la sede de la imaginación. A una región del interior del cerebro —el cuerpo estriado— le incumbían, según Willis, la percepción y el movimiento, mientras que al cerebelo y a las regiones adyacentes les competía el gobierno de todas las funciones involuntarias del sistema nervioso. Con el tiempo se comprobó que esa ordenación era en parte engañosa y en parte inexacta. Pero los trabajos de Willis iniciaron una serie larga de esfuerzos dirigidos a resolver la cuestión sobre la relación entre región cerebral y función específica del organismo.

Emanuel Swedenborg (1688-1772), anatomista sueco, sostenía que la propia corteza cerebral, de apariencia uniforme, debía de estar constituida por campos que cumplían distintas funciones. ¿Cómo, si no, podrían diferenciarse los diversos aspectos de nuestro pensamiento, de los cuales Swedenborg hacía responsable a la corteza cerebral? Desde entonces, los investigadores dejaron de considerar el cerebro una masa homogénea para verlo como un mosaico de distintos órganos o cuasiórganos unidos mediante fibras nerviosas.

¿Cómo se cartografía un cerebro?

Los primeros intentos de una división del sistema nervioso llevaron implícita la pregunta de si había determinadas partes dedicadas a la percepción y otras al movimiento; es decir, si unas partes eran exclusivamente sensitivas y otras exclusivamente motoras. Sin previo acuerdo, Charles Bell (1774-1842), un anatomista escocés, y François Magendie (1783-1855), fisiólogo francés, descubrieron la ley de las raíces de la médula espinal. En su honor se la denomina ley de Bell y Magendie, que afirma que las raíces posteriores de los nervios raquídeos son sensitivas, y las anteriores son motoras.

También Pierre Flourens (1794-1867), otro fisiólogo francés, se ocupó de la organización del sistema nervioso. Con tal objeto, experimentó con el cerebro dejado al descubierto de un perro vivo. La estimulación mecánica de la parte posterior del encéfalo expuesto desencadenaba contracciones musculares. En cambio, la estimulación de la parte anterior no provocaba ninguna reacción visible. De cuya observación Flourens

RESUMEN

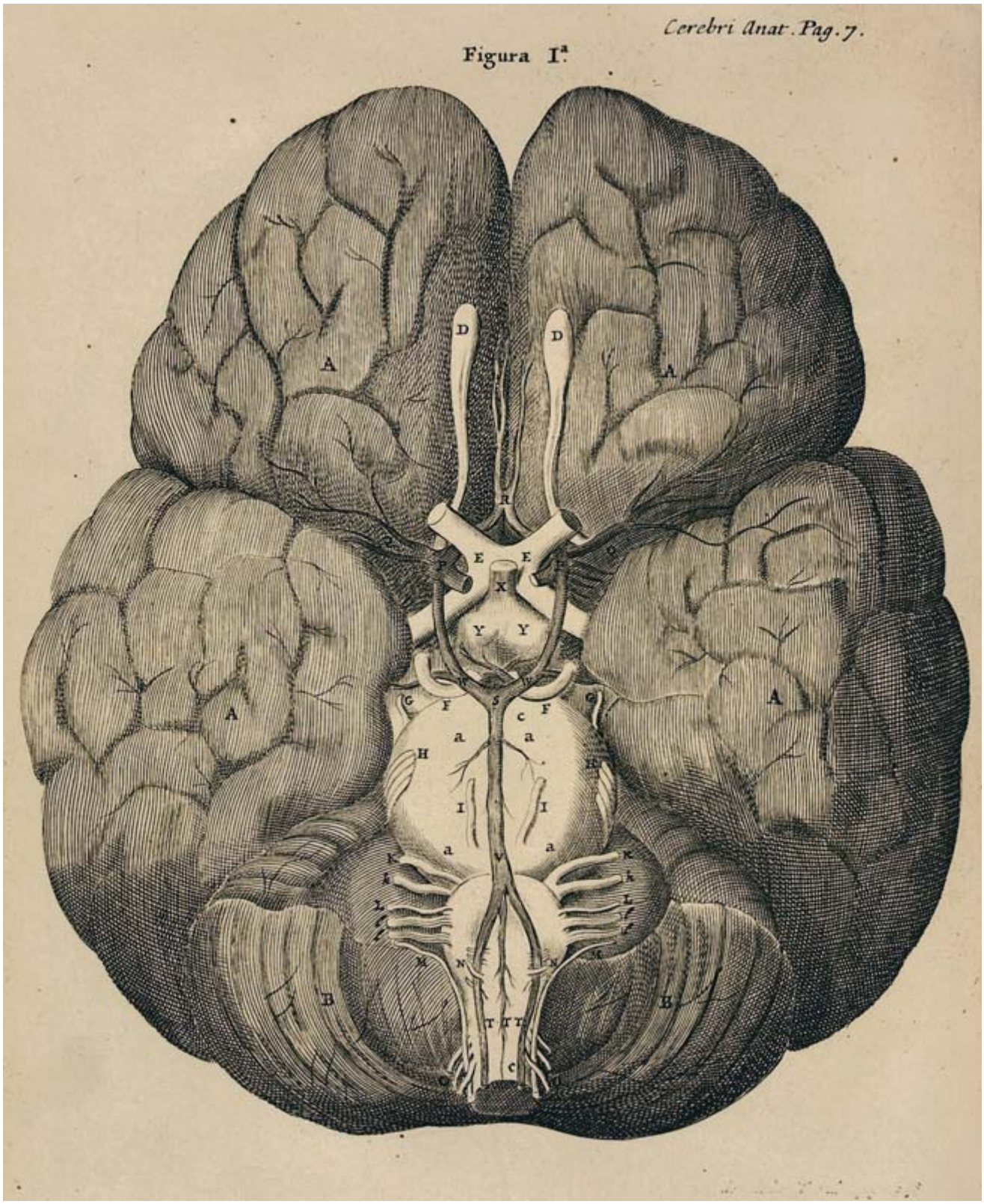
Cerebro, psique y ordenador

1 Thomas Willis (1621-1675) fue pionero en proponer una clasificación de las regiones cerebrales según sus funciones. Otros investigadores siguieron sus pasos.

2 Gracias a los experimentos con cerebros de animales en vivo y a la estimulación eléctrica de encéfalos humanos se acotaron los campos de la corteza cerebral. Asimismo, se abrió camino a la idea de un flujo de información a través del sistema nervioso.

3 Wilhelm Wundt (1832-1920) aportó una doctrina científica a la psique: la psicología moderna.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 2

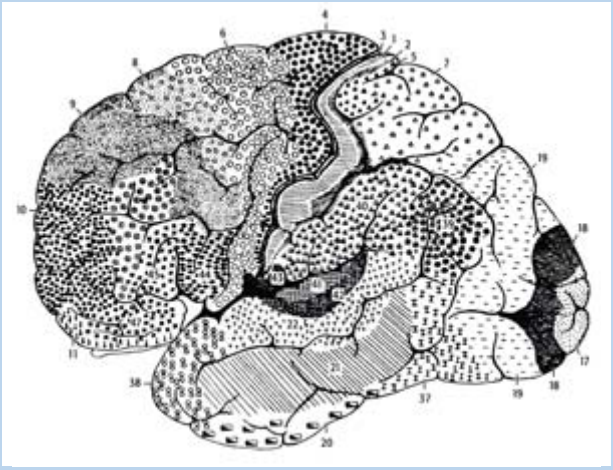


DE: *CEREBRI ANATOME*, THOMAS WILLIS, 1664

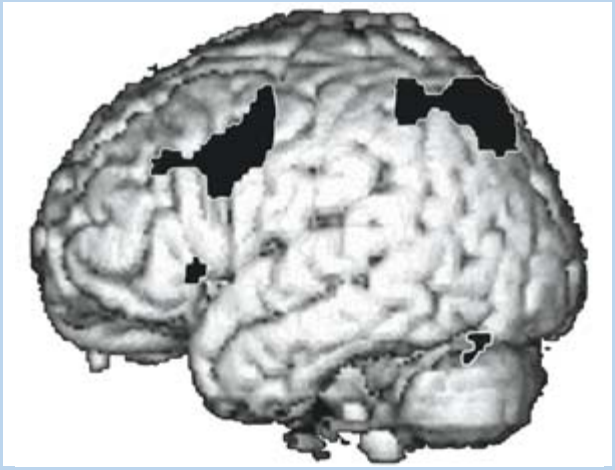
PRIMERAS CARTOGRAFÍAS

Base del encéfalo, con los bulbos olfatorios, el quiasma óptico, los cuerpos mamilares, la protuberancia, el origen de los nervios craneales y la anastomosis circular formada por la carótida interna, las arterias cerebrales anterior y posterior y las comunicantes posteriores, hoy llamada «polígono de Willis». Calcografía, grabada por el arquitecto Christopher Wren, de *Cerebri anatome* (1664), obra de Thomas Willis, pionero en la investigación neuroanatómica.

El mapa del pensamiento



Este mapa de la corteza de un cerebro humano en perspectiva lateral (*la izquierda es lo anterior*) se basa en las investigaciones de Korbinian Brodmann, realizadas en 1909. Los campos numerados se diferencian en su arquitectura tisular, lo que indica una estructura peculiar de la red nerviosa allí.



Mientras se utiliza la memoria de trabajo están activos dos campos de la corteza cerebral (*en negro*). Las personas que participaban en el ensayo tenían que apretar un botón cada vez que, en una serie de letras, aparecía de nuevo la letra que se había ya presentado en la secuencia en penúltimo lugar. Al mismo tiempo, los experimentadores medían la actividad cerebral de los probandos mediante una resonancia magnética nuclear funcional.

O. SPECK

creyó poder concluir que el cerebro posterior era motor, y el anterior, sensitivo.

Tuvo que pasar medio siglo antes de que Eduard Hitzig (1838-1907) y Theodor Fritsch (1838-1897) investigaran con mayor detenimiento, en Berlín, esa carencia de reacción en la excitación del cerebro anterior. Con ese propósito, estimularon eléctricamente la corteza cerebral de gatos. Cuando excitaban los dos tercios corticales posteriores, no se producía de hecho ningún tipo de efecto; pero una estimulación del cerebro frontal desencadenaba movimientos en las extremidades situadas en el lado contrario al sitio excitado. Si rebajaban la intensidad del estímulo, podían incluso causar la contracción selectiva de grupos musculares independientes pertenecientes a esas extremidades. Para confirmar sus resultados, extirparon los campos corticales que habían venido estimulando. Comprobaron así que, tras dicha operación, los animales apenas podían mover el miembro en cuestión.

Resultaba, mientras tanto, cada vez más claro que a las distintas regiones corticales les incumbían diferentes tareas. El neurólogo francés Paul Broca (1824-1880) corroboraba una observación realizada con anterioridad por Marc Dax, un médico rural, según la cual los pacientes con pérdida de la capacidad del lenguaje —es decir, con afasia— solían presentar lesionada una región muy precisa de la mitad izquierda del cerebro. Dicha área recibiría, desde entonces, el nombre de región de Broca.

Poco después, se certificó también la heterogeneidad anatómica de la corteza. Korbinian Brodmann (1868-1918), neurólogo y anatomista alemán, distinguió las diferentes regiones de la corteza cerebral en razón de la forma en que se configuraban a partir de las células. Ganaba, pues, terreno la idea de la estrecha vinculación entre estructura y función cerebral.

Un decisivo paso adelante lo dio, a mediados del siglo XX, Wilder Penfield (1891-1976). Se propuso este neurocirujano canadiense precisar la función de distintos campos cerebrales en pacientes que habían de someterse a una intervención, a fin de orientarse mejor durante la operación quirúrgica cerebral. Para ello, con los pacientes despiertos, estimuló eléctricamente en distintos lugares la corteza, puesta al descubierto, y tomó nota de sus percepciones. Dependiendo del lugar donde se producía la excitación, los sujetos describían, por ejemplo, relámpagos luminosos o ruidos indefinibles. Al-

gunas veces realizaban movimientos bruscos e involuntarios de determinados músculos, por ejemplo de un dedo.

Pero cuando Penfield estimuló regiones corticales específicas durante el sueño, los pacientes informaron de la aparición de complejos cuadros de recuerdos. Tras una excitación de esta índole, explicaba cierta mujer: «He oído algo, pero no sé lo que es». Después de la estimulación repetida y sin previo aviso del mismo lugar, agregó ella: «Oh, sí, creo que oí a una madre llamar a su pequeño. Me parece que esto pasó hace algunos años. Era alguien del vecindario en el que yo vivía». Si Penfield estimulaba otra zona, suscitaba recuerdos diferentes: «Sí, he oído voces, por algún sitio río abajo; una voz masculina y otra femenina... Creo que he visto el río».

Gracias a este tipo de experimentos se pudo acotar con exactitud las funciones de los distintos campos de la corteza cerebral. Los mapas que hoy se encuentran a nuestra disposición han alcanzado ya una extraordinaria complejidad. Por citar un ejemplo, el área de la corteza que elabora los estímulos visuales en los monos *Rhesus* abarca más de treinta campos diferenciados, que sepamos; en el caso de los humanos es probable que se supere esa cifra.

Del conocimiento así adquirido surgió una nueva perspectiva en la consideración del cerebro. Se abrió camino la idea de un flujo de información a través del sistema nervioso, en el que intervenían, de forma acorde, neuronas estimuladoras e inhibidoras. Se asimiló el cerebro a un aparato que recibía señales, las elaboraba, registraba recuerdos de ellas y respondía, a su vez, con otras señales. A partir de esa concepción, la cibernética —ciencia de la regulación y el gobierno de las máquinas y los organismos— construyó una primera infraestructura teórica, cuyos cimientos había puesto el matemático Norbert Wiener (1894-1964) en el decenio de los cuarenta. Para ilustrar este nuevo planteamiento de la función cerebral, se eligió un modelo que acababa de aparecer por entonces, desarrollado a partir de las calculadoras: el ordenador.

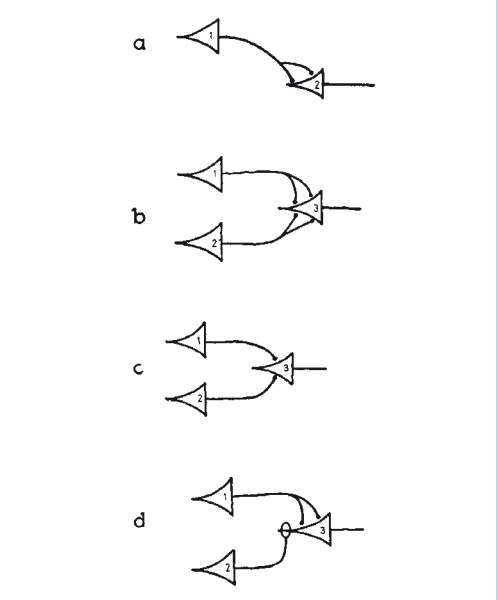
John von Neumann (1903-1957), físico y matemático, asimiló los potenciales de acción a señales digitales. Demostró que toda máquina con un comportamiento hasta cierto punto complejo tenía que poseer un registro o una memoria. Por su lado, Warren McCulloch (1898-1969) y otros mostraron que ciertas neuronas, agrupadas, ejecutaban operaciones lógicas a la manera en que procedía una calculadora.

El hombre, una caja negra

A finales del siglo XIX, Sigmund Exner (1846-1926), fisiólogo austríaco, propuso una idea audaz: la arquitectura organizativa de un conjunto de neuronas podría determinar su función. Transcurrieron, sin embargo, varios decenios antes de que alguien se decidiera a llevarla a la práctica. Karl Steinbuch, de la Universidad de Karlsruhe, proyectó, alrededor de 1960, una

Lógica en el sistema nervioso

Warren McCulloch representó esquemáticamente el sistema nervioso de la forma que se ilustra a la derecha. En los dibujos, los triángulos corresponden a los cuerpos de las células nerviosas; las líneas, a sus axones; los engrosamientos, a las sinapsis estimuladoras; y el anillo, a una sinapsis inhibidora. El estímulo fluye desde la neurona presináptica (*izquierda*) hacia la postsináptica (*derecha*). Cada sinapsis transmite una actividad con un valor de +1 (estimulante) o de –1 (inhibidor). El umbral de la neurona postsináptica es, en el esquema de McCulloch, 2. Consecuentemente, en (*a*) la neurona presináptica puede traspasar su actividad a la neurona postsináptica. En (*b*) basta con que una de las dos neuronas presinápticas estimule la neurona postsináptica. Se realiza así una conexión «O». En (*c*) la neurona postsináptica solo está activa cuando se excitan las dos neuronas presinápticas. Nos hallaríamos ante una conexión «Y». En (*d*) la neurona postsináptica solo se excita si la neurona presináptica estimulante está activa, pero no lo está la neurona inhibidora. Nos encontramos aquí ante una conexión «NO».

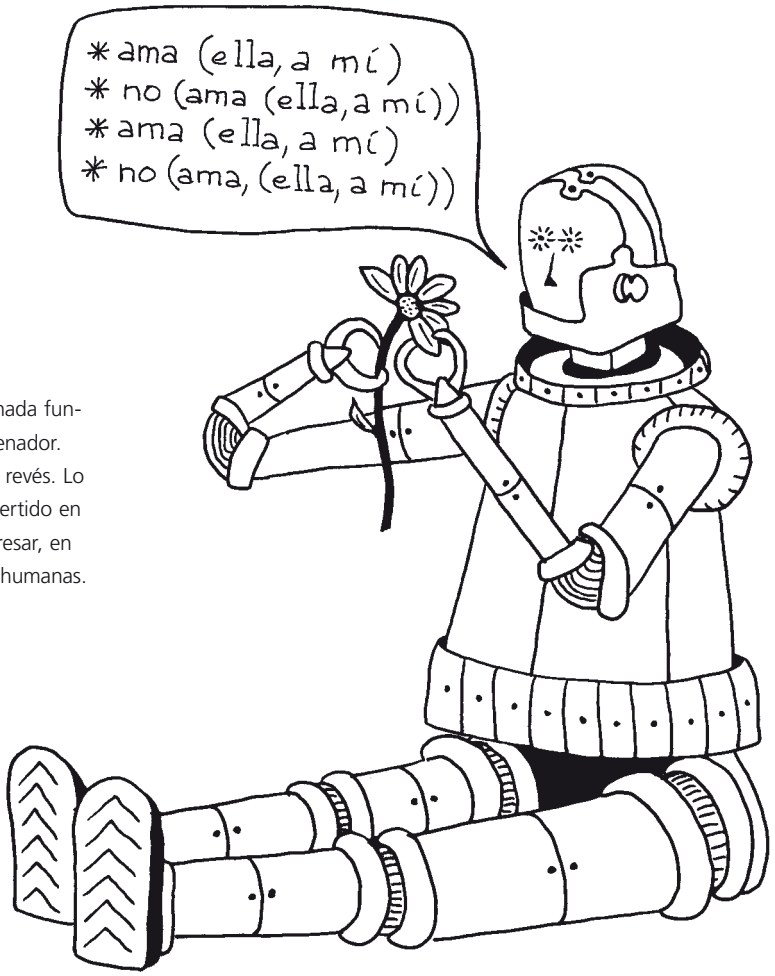


memoria asociativa artificial, la primera red neuronal. Se trataba de la *Lernmatrix* (matriz didáctica).

Pese a que los ordenadores no se componen de células nerviosas sino de material electrónico, se revelaron como un modelo muy fructífero del funcionamiento cerebral. Además, en última instancia, la elaboración de la información no depende de una determinada sustancia, sino de las conexiones lógicas entre los elementos de construcción que lo conforman, sean estos neuronas o transistores. Por eso, son muchos los informáticos que defienden que, en principio, el ordenador puede llegar a igualar, e incluso superar, la capacidad de rendimiento del cerebro humano. No resulta por tanto extraño que, desde mediados del siglo XX, el modelo computacional ejerciera una profunda influencia en la psicología, ciencia que por entonces conocía un desarrollo notable.

Con todo, la historia de la psicología no podía parangonarse con la larga trayectoria de la investigación científico-médica del cerebro. Cierto es que ya en la Antigüedad se conocían algunas regularidades del comportamiento humano, pero su marco teórico pertenecía al dominio de la filosofía sensu stricto. Los científicos de la Antigüedad y del Medievo aceptaron la imposibilidad de investigar sistemática y experimentalmente la conducta. Lo advertimos en san Agustín (354-430) y en santo Tomás de Aquino (1225-1274). Tampoco en el Renacimiento cambiaron mucho las cosas a este respecto.

Solo en el siglo XIX comenzó a modificarse tal punto de vista. Ernst Heinrich Weber (1795-1878), fisiólogo alemán, se aprestó a medir el rendimiento de los sentidos, explorando con un compás de dos puntas la sensibilidad táctil de la piel. Determinó la mínima distancia posible entre las dos puntas del compás en cuyo intervalo estas se seguían percibiendo por separado; el valor variaba para cada región de nuestra superficie corporal. Weber midió también en otros experimentos el umbral de la percepción sensitiva. En ellos, las personas sometidas al ensayo referían si la intensidad de un determinado estímulo les resultaba mayor, menor o igual que la de un estímulo-control. Gustav Theodor Fechner (1801-1887) acuñó el término de psicofísica para este tipo de investigaciones;



R. -B. ILLING

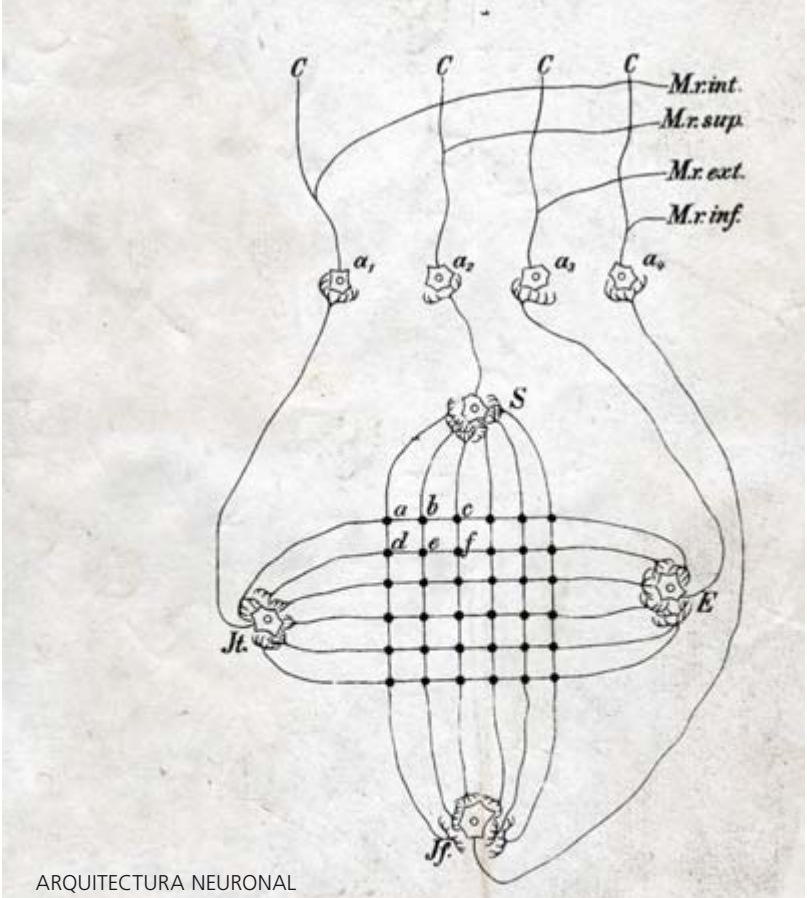
UN ROBOT ENAMORADO
En el marco de la corriente teórica denominada funcionalismo se equiparó el cerebro a un ordenador. Pero esta equiparación también es válida al revés. Lo que significaría que si a un ordenador convertido en robot le dotamos de un cuerpo podría expresar, en principio, todas las cualidades emocionales humanas.

demostró que podía establecerse una relación matemática entre las sensaciones y los fenómenos físicos.

Tras la fundación de la experimentación psicológica por Weber y Fechner, Wilhelm Wundt (1832-1920) dio el primer paso para la creación de una doctrina científica del alma o psique, la psicología. Debía emplear esta la metodología propia de las ciencias naturales. Wundt quería que su nueva ciencia se separara nítidamente del enfoque metafísico y del fisicalismo. De ahí que no hablara nunca de alma, sino de conciencia. Además, diferenció de la psicología cuanto se refería a la fisiología. A su entender, la psicología se ceñía a los fenómenos experimentados en la conciencia, cuyos contenidos brotan de la combinación o la asociación de sensaciones elementales.

La psicología de Wundt registraba, de un modo principal y detallado, las estructuras de la conciencia. Se trataba, pues, de una psicología descriptiva. En cambio, el norteamericano William James (1842-1910) se interesó más por las funciones de nuestra actividad mental en el quehacer diario: por ejemplo, al solucionar un problema o al establecer unos objetivos de actuación.

La dirección que había tomado la investigación psicológica fue continuada por el conductismo. Esta corriente orientó la metodología psicológica hacia la física. Sus representantes, a cuya cabeza se puso John B. Watson (1878-1958), se ocuparon de forma exclusiva de los comportamientos visibles y mensurables de los organismos, para dejar de lado los fenómenos



ARQUITECTURA NEURONAL
En 1894, Sigmund Exner, fisiólogo austríaco, hizo una propuesta revolucionaria: la realización de comportamientos precisos (pensemos en los movimientos oculares) estaba determinada no solo por la actividad de células nerviosas individuales, sino también por la estructura específica de la red nerviosa que las sustentaba.

Percepción medida

Ernst Heinrich Weber investigó el incremento de intensidad (ΔI) de un estímulo sensorial que era necesario para poderlo diferenciar de un estímulo-control y descubrió que dicho incremento era una fracción constante de la intensidad (I) del estímulo-control:

$$\Delta I/I = k$$

La constante (k) tiene, además, un valor característico para cada tipo o modalidad de sentido. Así, por ejemplo, 1/60 para la luminosidad de la luz blanca, 1/10 para el volumen de sonido de tonos de grado medio y 1/3 para los sabores salados.

Esta relación aritmética fue ampliada por Gustav Theodor Fechner (1801-1887), quien relacionó la intensidad del estímulo experimentada por autobservación con la intensidad del estímulo (I) medida por el aparato. Tras considerables mediciones, Fechner estableció la relación:

$$R = k \times \log I$$

La constante (k) seguía teniendo aquí un valor típico para cada modalidad de sentido.

¿Ha quedado refutado el funcionalismo?

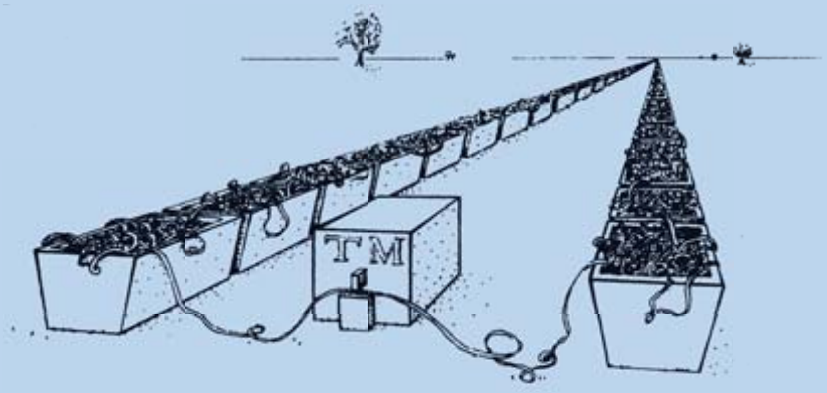
Para el funcionalismo, cerebro y ordenador son intercambiables. De esa tesis disiente Roger Penrose, matemático y físico de la Universidad de Oxford, quien ha cuarteado los cimientos en que se basa.

Así argumenta Penrose: todos los ordenadores concebibles en el momento presente son, en principio, máquinas de Turing, que efectúan paso a paso series de operaciones, como, por ejemplo, leer una banda y, según determinadas reglas, escribirla de nuevo. [Con su denominación rinden homenaje al matemático inglés Alan Turing (1912-1954).]

Las máquinas de Turing pueden representar cualquier sistema formal, esto es, cualquier sistema en el que todo elemento y toda operación son definidos de una manera unívoca. Si la máquina de Turing fuera un modelo para el cerebro, las funciones cerebrales se corresponderían también con un sistema formal.

Ahora bien, de acuerdo con el primer teorema de Gödel, existen en todo sistema formal postulados matemáticos que, aunque ciertos, son indemostrables desde el interior del sistema: los llamados postulados de Gödel. [Kurt Gödel (1906-1978) fue un célebre lógico y matemático austríaco.]

Trasladado al caso del cerebro, eso significa que, si nuestro pensamiento se correspondiese con un sistema formal, como afirma el modelo funcionalista del cerebro, no podríamos conocer a través del razonamiento lógico la verdad de los postulados de Gödel relativos a este sistema. De donde Penrose deduce que la capacidad del conocimiento humano no es abarcable en un sistema formal: el cerebro no es una máquina de Turing y los presupuestos del funcionalismo son, consecuentemente, falsos.



R. PENROSE, COMPUTERDENKEN

mentales y la conciencia. Para los conductistas, hombre y animal no eran otra cosa que una *caja negra*; es decir, algo en cuyo interior no se puede penetrar; el mundo interno resulta incomprensible. Se aplicaron, pues, a explicar las formas de comportamiento de los humanos y de los animales en términos exclusivos de respuestas desencadenadas por estímulos. Los conductistas, o *behavioristas*, rechazaban de plano la idea de que los rasgos del comportamiento pudieran heredarse.

Sin embargo, cuando intentaron comprender los fenómenos complejos del aprendizaje se hizo palmario que carecían de recursos argumentativos. En particular, les resultó imposible de explicar mediante un simple esquema de estímulo-respuesta el aprendizaje del lenguaje en los humanos. El desarrollo de los ordenadores terminó por sentenciar la suerte del conductismo.

Las computadoras fueron adquiriendo una capacidad creciente para ejecutar tareas que hasta entonces habían quedado reservadas al hombre. Se convirtieron, por ejemplo, en contrincantes ajedrecísticos dignos de ser tomados en serio. Lo consiguieron solo gracias a una rica «vida interior» diseñada con precisión, es decir, gracias a la introducción en ellos de uno o varios programas. Ahora se trataba, pues, de entender esa vida interior para desentrañar la naturaleza del comportamiento complejo: en el lugar de la introspección de la conciencia propuesta por Wundt se instalaba el entendimiento matemático exacto de los programas de ordenador.

Así fue como aparecieron dos enfoques que iban a configurar las actividades subsecuentes en el terreno del conocimiento del cerebro y la mente:

- De acuerdo con el primero, la inteligencia humana podría consistir, en última instancia, en algo semejante a las capacidades de los ordenadores; esto es, algo similar a un programa informático capaz de gobernar las operaciones lógicas y de dirigir las vías de comunicación. El dominio de la operación de los ordenadores constituiría, por tanto, un paso importante para el entendimiento del cerebro.
- De acuerdo con el segundo, coherente con lo anterior, el pensar, el sentir y el ser consciente quizá no estuvieran ligados con la sustancia cerebral en sí, sino que podrían depender exclusivamente de las relaciones lógicas que

establecieran sus elementos constituyentes, lo que, de paso, haría a estas funciones perfectamente ejecutables por un ordenador.

Sobre esas dos ideas se asentó el funcionalismo, la doctrina de referencia de la moderna ciencia cognitiva. Si se compara con los modelos del funcionamiento cerebral precedentes, el funcionalismo sobrepasó una frontera que hasta entonces había estado sobrentendida pero perfectamente presente. Aunque los científicos de otros siglos comparasen el cerebro con una cisterna o un órgano, tenían muy claro que, en cuanto tal, *no era* ni una cisterna ni un órgano. Mas para el funcionalismo, el cerebro no solo poseía semejanzas con un ordenador, sino que, además, *constituía en verdad* un ordenador. Consecuentemente, a partir de un ordenador debería ser también posible construir un organismo completo, pues bastaba con que se le proveyera de un cuerpo adecuado que lo convirtiera en un robot.

Algunos no dudaron en colorear tal idea con predicciones arriesgadas. Marvin Minsky, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, respondía lo siguiente a la pregunta de si llegaría un día en que los robots dominarían la Tierra: «Sí, pero no debemos tener miedo de esta visión, pues esos robots seremos nosotros mismos. Si desarrollamos, con ayuda de la nanotecnología, recambios para el cuerpo y el cerebro, viviremos más, poseeremos mayor sabiduría y disfrutaremos de unas capacidades que ahora no podemos ni sospechar». ¿Futuribles con base real o pura fantasía científica? Al escepticismo que suscitan los pronósticos de tal índole hay que añadir en este caso una circunstancia nada desdeñable: el modelo que constituye su infraestructura (el ordenador) se ha mostrado insuficiente.

Una ojeada al cerebro

Merced a las modernas técnicas de formación de imágenes, como la tomografía por emisión de positrones (TEP) o la resonancia magnética nuclear funcional (RMf), los investigadores están perfectamente capacitados para *mirar el cerebro* de los sujetos de ensayo que han dado su consentimiento informado para tal fin. Determinadas percepciones, emociones o actividades intelectivas específicas (ver, hablar o percibir) van asociadas a actividad neuronal en zonas del cerebro muy precisas. Dichos correlatos neuronales de la experiencia consciente confirman y amplían la teoría de la localización, que, con el tiempo, se había ido quedando en un discreto segundo plano. La lista de los correlatos encontrados hasta ahora es larga y, a buen seguro, aumentará de un modo considerable en el futuro.

Nuevas investigaciones de este tipo han vuelto a centrar el interés en la relación entre cuerpo y alma o, con otros términos, entre cerebro y conciencia. Preocupaciones tales quedan totalmente al margen del funcionalismo. Además, la crítica contra los presupuestos de esta corriente se ha ido intensificando a lo largo de los últimos decenios; crece el número de científicos que se distancian de ella, habida cuenta de que las actividades superiores del cerebro son, según recientes trabajos, difícilmente separables del tejido nervioso y de sus propiedades. Por otro lado, el ordenador tampoco ha pasado de ser algo más que una metáfora apropiada tan solo para determinados aspectos del funcionamiento cerebral.

Se muestra aquí, gracias a la historia de la investigación cerebral, un motivo de reflexión: una y otra vez los estudiosos se han visto forzados a relativizar, cuando no a desechar por entero, conceptos que predecesores suyos habían elaborado mediante cuidadosas observaciones y minuciosos experimentos que parecían sólidamente contrastados. ¿Qué ideas, perspectivas y modelos ocuparán el lugar de los actualmente en boga?

De unos decenios a esta parte, se aprecia una evolución contradictoria entre las ciencias de la vida, por un lado, y la física, por otro. En un comienzo, los biólogos no cuestionaban la naturaleza independiente del alma y la conciencia. Pero la biología moderna tiende a explicarlo todo desde bases mecanicistas y moleculares. Simultáneamente, la física se ha ido alejando poco a poco de las ideas mecanicistas para resaltar con vigor creciente el papel de la conciencia, es decir, del observador.

La neurobiología ha ahondado en el campo de las moléculas y de sus reacciones químicas. Pero casi todos los modelos moleculares de las funciones nerviosas propuestos siguen fieles al mundo de ideas de la física clásica. Ahora bien, ¿por qué debería basarse la forma del funcionamiento del cerebro en la física del siglo XIX? Cabe que en el futuro la situación cambie. Tal vez no tarden en introducirse la física y la química cuánticas en la neurobiología y, con ellas, todos sus hechos paradójicos, hipótesis y percepciones desconcertantes.

***Robert-Benjamin Illing**, catedrático de neurobiología y biofísica en la Universidad de Friburgo, comparte sus tareas docentes con el estudio de la historia de la ciencia.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

FOUNDATIONS OF THE NEURON DOCTRINE. G. M. Shepherd. Oxford University Press, Oxford, 1991.

DAS GEHIRN - ORGAN DER SEELE? ZUR IDEENGESCHICHTE DER NEUROBIOLOGIE. Dirigido por E. Florey, O. Breidbach. Akademie Verlag, Berlín, 1993.

ORIGINS OF NEUROSCIENCES. S. Finger. Oxford: Oxford University Press, 1994.

HISTORIA

Herófilo y la anatomía cerebral

Hace más de 2000 años, Herófilo de Calcedonia fundó la anatomía humana, la doctrina de la estructura del cuerpo humano. Describió la arquitectura de nuestro cerebro, de los nervios cerebrales y de la retina ocular. Pero sus métodos no eran precisamente remilgados

HELMUT WICHT Y HARTWIG HANSER

RESUMEN

Primer anatomista

1 Herófilo de Calcedonia (ca. 330 a. C.-250 a. C.) es considerado el primer investigador que estudió sistemáticamente la estructura del sistema nervioso humano.

2 Según los informes de Celso (ca. 25 a. C.-50 d. C.), Herófilo llevó a cabo vivisecciones, es decir, disecciones del cuerpo humano en sujetos vivos.

3 Herófilo describió, entre otras estructuras, el cerebro y el cerebelo, los nervios cerebrales, los vasos sanguíneos venosos del cerebro, el cuarto ventrículo cerebral y la retina ocular. Además, diferenció entre nervios sensitivos y motores.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 39

Alejandría en el año 270 a. C. Una ciudad joven, cuya fundación apenas se remontaba a dos generaciones atrás. Sobre la isla de Faros, situada delante del puerto, se levantaba la torre iluminada más alta del mundo, que pasó a la historia como una de las siete maravillas de la Antigüedad. La corona de Alejandría adornaba la testa de Ptolomeo II, hijo de uno de los generales de Alejandro Magno. Como buen dictador militar, Ptolomeo recibía honores de faraón y reconocía el incesto con su hermana Arsinoe.

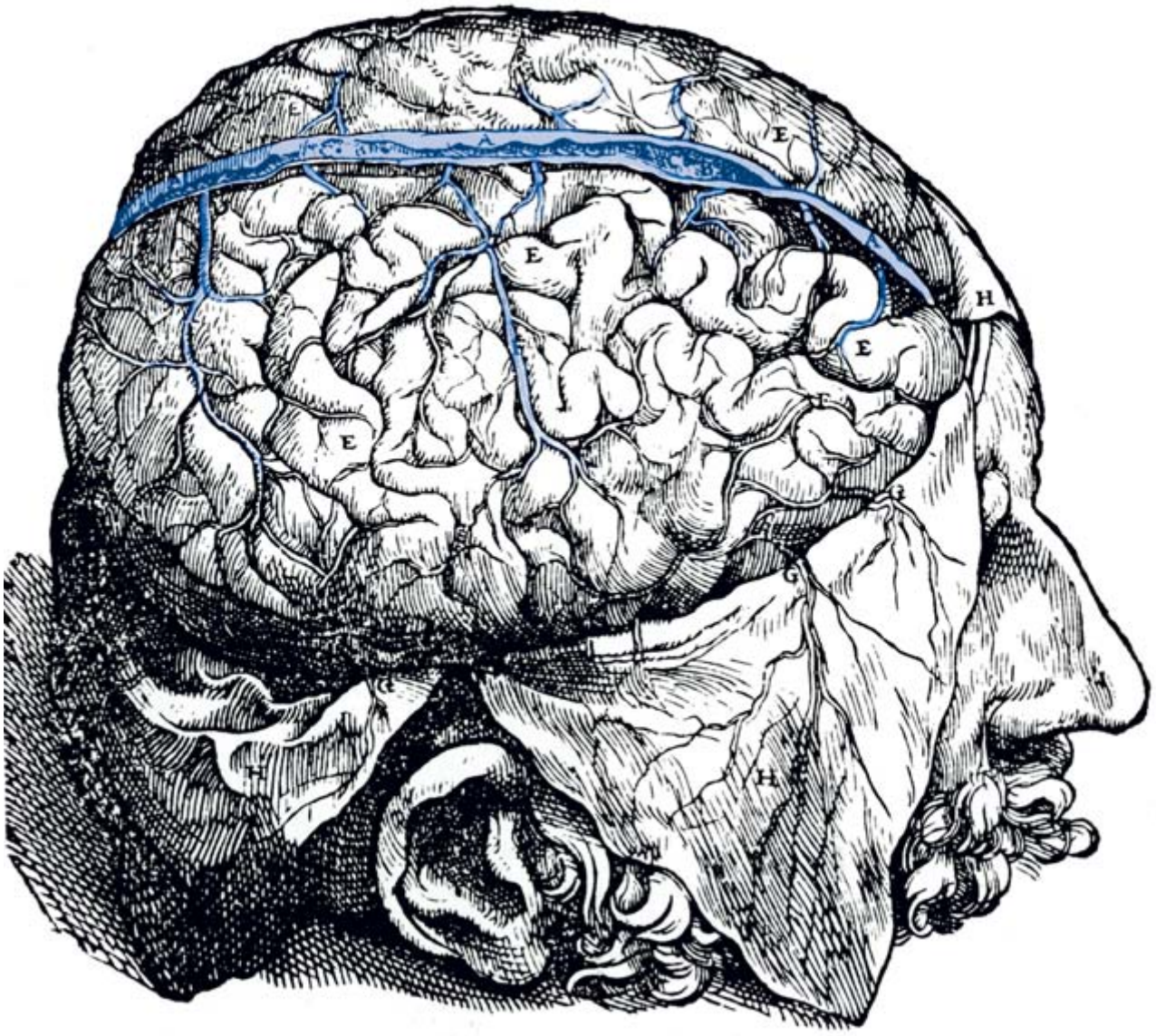
En ese crisol turbulento confluyeron hombres procedentes de todas las partes del mundo. Alejandría experimentó un auge espectacular, tanto económica como culturalmente. También la ciencia se desarrolló. En medio del Brucheion, el distrito real de la ciudad situado al noreste de la misma, el gobierno ordenó levantar una academia: el Museion (Museo), dotado de laboratorios, colecciones y bibliotecas. Aquí no se asistía a ningún arduo debate sobre la ética de la investigación, ni se realizaban escrupulosas observaciones sobre la valoración de las consecuencias de la técnica.

Los científicos de entonces, al igual que los políticos coetáneos, no se andaban con muchos miramientos y buscaban ante todo la eficacia. Presupuestos opulentos y salarios magníficos atrajeron a muchas cabezas inteligentes de todas partes del orbe hacia este paraíso de la investigación. El dueño de una de las más notables fue Herófilo de Calcedonia.

Nacido alrededor de 330 a. C. en lo que hoy en día es una parte de la ciudad de Estambul, Herófilo estudió medicina con Praxágoras de Cos, diez años mayor que él, en la tradición del famoso Hipócrates (ca. 460-370 a. C.), lo que le franqueó seguramente las puertas del Museion. Como médico practicante, Herófilo llevó a cabo un método de terapia tradicionalmente acreditado: dieta, medicamentos y sangrías ocasionales. Pero en lo referente al diagnóstico fue muy por delante de su tiempo. En las visitas a sus pacientes llevaba siempre consigo una clepsidra —un reloj de agua— portátil. Cuando tomaba el pulso de sus pacientes no lo comparaba con el suyo propio, como hacían el resto de los médicos, sino que medía con la clepsidra el tiempo justo y calculaba entonces la frecuencia exacta. Los enfermos se quedaban impresionados ante ese despliegue de tan alta tecnología y de tanta competencia; posiblemente, eso solo tenía ya un marcado efecto curativo. En todo caso, los negocios de Herófilo iban viento en popa, pues toda Alejandría tenía un seguro obligatorio de enfermedad.

Médico, investigador y protegido de los poderosos

Sin embargo, en el fondo de su corazón Herófilo se sentía más investigador que médico. Dirigía en el Museo un grupo de trabajo propio del que formaban parte personal técnico y alumnos médicos. Sus contactos con los centros del poder eran inmejorables, y gozaba de un trato casi amistoso con Ptolomeo. Todo aquello que Herófilo necesitaba para sus investigaciones, lo recibía sin demora. En tanto médico con intereses anatómicos tenía un objetivo prioritario:



TODAS LAS ILUSTRACIONES DE ESTE ARTÍCULO: ANDREAS VESALIUS, *DE HUMANI CORPORIS FABRICA*, BASILEA, 1543; COLORACIONES POR HELMUT WICHT

la utilización del cuerpo humano como objeto de disección.

Aquí termina la historia rosada del personaje para adentrarnos en un campo minado, aunque solo sea porque el resto de las noticias que conocemos sobre Herófilo procede de suposiciones e informaciones de segunda mano. De él mismo no nos ha llegado ningún texto extenso. Tan solo disponemos de algunos fragmentos —en conjunto suman quizás unas 20 o 30 líneas— que autores posteriores tomaron supuestamente de sus labios. La biblioteca del Museo, que contenía todos sus escritos, ardió en un incendio en el año 48 a. C.

Lo que Herófilo hizo, escribió y enseñó lo sabemos a través de las aportaciones de Celso, Galeno, Rufo, Sorano y Tertuliano, autores que vivieron mucho después. Según ellos, Herófilo escribió al menos seis libros (teniendo en cuenta que «libro» equivalía por entonces a «rollo de pergamino»): un trabajo sobre anatomía, otro sobre el pulso, un tercero sobre el arte de las parteras, otro sobre terapia, un quinto sobre dieta y un sexto de enigmático título (*Contra las opiniones dominantes*).

De los escritos de Celso y del resto de los autores se desprende que Herófilo debió de haber sido un excelente anatomista, de hecho podría

UN CLÁSICO DE LAS PREPARACIONES ANATÓMICAS

Tras extirpar la bóveda craneal y apartar la membrana meníngea dura (duramadre), puede contemplarse el seno sagital superior, que transcurre a lo largo del cerebro, así como las venas de la corteza cerebral que desembocan en él (*destacados en azul*). Esta imagen y las siguientes proceden del *De humani corporis fabrica* de Vesalio, publicado en 1543. Vesalio es a la época moderna lo que Herófilo fue para la Antigüedad: *el* anatomista por antonomasia. Numerosas descripciones de Herófilo, quien no dejó ningún dibujo tras de sí, se pueden seguir perfectamente mediante las ilustraciones de Vesalio.

¿Era Herófilo un viviseccionista?

A las vivisecciones de Herófilo hace sobre todo referencia el siguiente texto del escritor romano Aulio Cornelio Celso (ca. 25 a. C.-50 d. C.).

«Debido a que los diferentes tipos de dolores y enfermedades surgen de los órganos internos, así piensan ellos [un determinado grupo de médicos, los "racionalistas"] que nadie que no conozca estos puede poner remedio a aquellos con una cura. [Creen también] que es preciso cortar y abrir los cuerpos de los muertos para escrutar sus vísceras e intestinos. [Piensan también] que los que de forma óptima realizaron mejor estas tareas fueron Herófilo y Erasístrato, quienes [además] diseccionaron, cuando su cuerpo estaba todavía vivo, a criminales que el rey les enviaba procedentes de las cárceles y observaron, mientras su espíritu permanecía todavía en ellos, lo que la naturaleza hasta entonces había mantenido oculto...»

Por su parte, Celso opina que este método es brutal e inútil:

«Pero diseccionar cuerpos vivos es cruel e innecesario; en cambio, abrir los de los muertos resulta imprescindible para todos aquellos que tienen el deseo de saber: pues deben conocer la colocación y la ordenación que el cadáver, mejor que el hombre vivo y herido, ofrece.»

Celso es además extremadamente cuidadoso en su formulación. Dice tan solo que hay gentes que sostienen que Herófilo e Erasístrato realizaron vivisecciones.

Para los latinistas, recogemos, a fin de que pueda ser comparado, el original en latín del primer texto de Celso citado:

«De medicina» (proemium, 23, 24 y 74): «*Praeter haec, cum in interioribus partibus et dolores et morborum varia genera nascantur, neminem putant his adhibere posse remedia, qui ipsas ignoret. Ergo necessarium esse incidere corpora mortuorum, eorumque viscera atque intestina scrutari; longeque optime fecisse Herophilum et Erasistratum, qui nocentes homines a regibus ex carcere acceptos vivos inciderint, considerarintque etiamnum spiritu remanente ea, quae natura ante clausisset...*»

Y también el del segundo texto:

«*Incidere autem vivorum corpora et crudele et supervacuum est, mortuorum discentibus necessarium: nam positum et ordinem nosse debent, quae cadaver melius quam vivus et vulneratus homo repraesentat.*»

Sensitivo y motor: la división forzosa del sistema nervioso

Herófilo y Erasístrato fueron los primeros en atribuir la capacidad de sentir (sensorial) y de actuar (motora) a los nervios. Antes se pensaba que los vasos sanguíneos eran los encargados de ambas tareas. La pareja de investigadores griegos sabía que de estas dos tareas se ocupaban nervios distintos; es decir, que existían nervios sensitivos y motores. Sin embargo, desde nuestro punto de vista actual, parece un disparate la afirmación de Erasístrato según la cual los nervios sensitivos procedían de las meninges, y los motores, en cambio, del cerebro mismo.

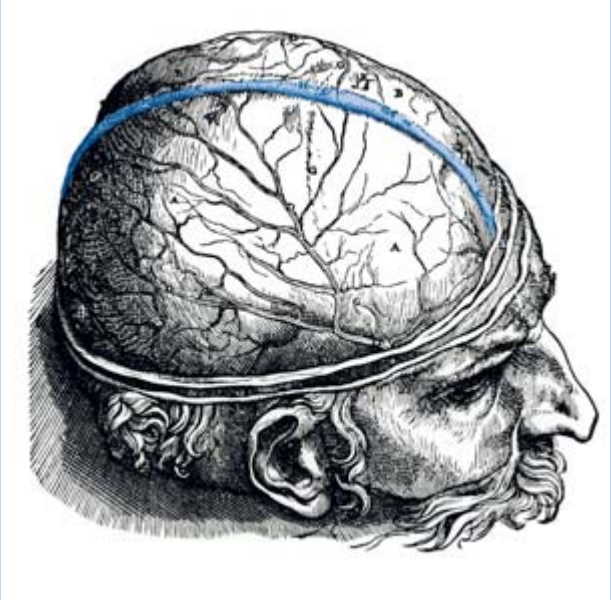
Por otro lado, el concepto sensomotor no llegó por entonces a ser reconocido. Ya en la Antigüedad, los críticos con Herófilo y Erasístrato señalaron con razón que, cuando se producían daños en los nervios, había alteraciones tanto sensitivas como motoras. Lo que parecía indicar que los nervios estaban mezclados y no separados en sensitivos y motores.

En el fondo, todos tenían razón. En el sistema nervioso periférico, es decir, el que se encuentra fuera del cerebro y de la médula espinal, la mayoría de los nervios están mezclados, tienen por tanto componentes sensitivos y motores. Pero, cuando los nervios se introducen en la médula espinal, se dividen siempre en dos raíces: la raíz posterior sensitiva y la raíz anterior motora. Charles Bell (1774-1842) y François Magendie (1723-1855) demostraron que la escisión de las raíces anteriores de los nervios espinales producía parálisis, y la de las raíces posteriores, insensibilidad. También estos experimentos fueron vivisecciones, pero realizadas a perros.

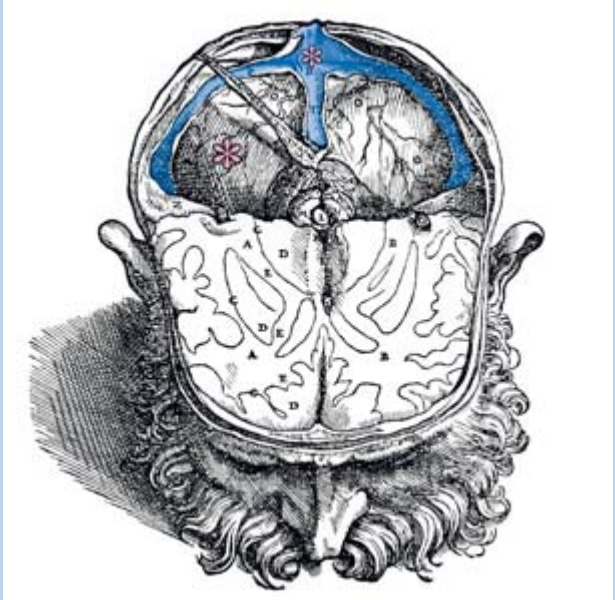
decirse que *el* anatomista de la Antigüedad. Lo cual, por otra parte, apenas resulta sorprendente, dado que Herófilo fue sencillamente el primero en diseccionar directamente el cuerpo humano y mirar en su interior. Y, según relatan, lo hizo con cuerpos vivos. Herófilo era viviseccionista.

Lo ratifica Aulio Cornelio Celso, que vivió aproximadamente desde 25 a. C. hasta 50 d. C., es decir, más de 200 años después que el médico griego. Hay que tener presente que Celso no atribuye a Herófilo y a su contemporáneo y homólogo Erasístrato la realización de vivisecciones para desacreditarlos. Simplemente señala que algunos de los descubrimientos llevados a cabo por la pareja de investigadores solo pueden basarse en observaciones hechas en organismos vivos.

Así, Herófilo fue el primero en describir correctamente las venas y las arterias pulmonares. Para ello resultó obligado que observara la dirección de la corriente sanguínea y los tipos de sangre (rojo brillante, arterial; rojo oscuro, venosa), lo que requería que la sangre se hallara circulando. También la diferencia entre nervios sensitivos y motores se remonta a Herófilo y Erasístrato. Hallazgo para cuya realización ambos investigadores intercambiaron de vez en cuando anhelos



BAJO LA BÓVEDA CRANEAL
Vista de la duramadre, tras serrar y separar la bóveda craneana. Destacado en azul se encuentra el seno sagital superior, una de las conducciones sanguíneas venosas de la duramadre.



CANALIZACIÓN CEREBRAL
El cerebro y la duramadre se han extirpado en la parte posterior de la cabeza. La falta del cerebro en la parte posterior pone de manifiesto otro trozo de duramadre que cubre el cerebelo: el tentorio cerebeloso (*asterisco grande*). Destacadas en azul pueden verse las conducciones sanguíneas que confluyen en el «torcular de Herófilo» (*asterisco pequeño*).

El «torcular de Herófilo»

Cuando se extirpa la bóveda craneana, lo primero que se ve no es el cerebro, sino una membrana cerebral dura, la duramadre (*ilustración de la izquierda*). Esta contiene cavidades llenas de sangre (*destacadas en azul*), a través de las cuales fluye la procedente del cerebro. Dichas cavidades no son, consideradas desde el punto de vista anatómico, auténticas venas, pues sus paredes carecen de la capa muscular elástica que caracteriza todos los vasos sanguíneos. Por esta razón, los anatomistas denominaron a dichas cavidades senos de la duramadre, esto es, ensenadas de la duramadre o conducciones sanguíneas venosas. Los senos más grandes se encuentran en el anillo que circunda posteriormente a las tiendas cerebelosas, en el «torcular de Herófilo», hoy denominado confluencia de senos. Desde allí, la sangre circula hacia abajo, hacia la vena yugular de la garganta, la cual surge debajo de la base del cráneo.

y nervios. La forma más sencilla de comprobar si un nervio seccionado o pellizcado es sensitivo o motor es a través de las pérdidas funcionales que estas operaciones ocasionan. Y la observación funcional implica necesariamente que el sujeto esté vivo en el momento de hacerla.

Espoleado por la crueldad

A fin de cuentas, Herófilo no era precisamente muy remilgado. Como ginecólogo, descubrió un aparato denominado *embryosphakter*, el «despedazador de embriones». Dicho instrumento debió de haberlo utilizado no solo para llevar a cabo abortos, sino también para salvar la vida de las embarazadas en caso de complicaciones severas. Sin embargo, es como si la muerte violenta y la crueldad espolearan a este hombre. En lugar de este aparato podía haber descubierto el estetoscopio, pero no lo hizo.

El cúmulo de descubrimientos anatómicos de Herófilo es impresionante. La retina ocular, las trompas uterinas, los órganos sexuales internos masculinos, el canal del nervio facial en el cráneo, un ventrículo cerebral así como sus grandes conducciones venosas, la división entre cerebro y cerebelo, diversos nervios cerebrales... Lo descubrió y describió de forma correcta.

No contó, sin embargo, con el reconocimiento de sus sucesores. Solo una estructura, una cavidad meníngea, fue denominada con su

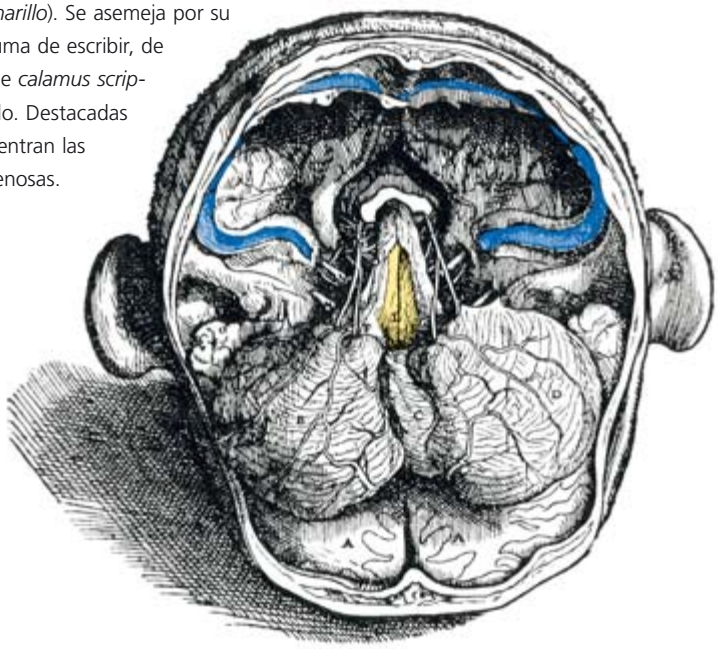
El desagüe del líquido cerebral

***Calamus scriptorius* podría traducirse por «pluma de escribir».** De hecho, el suelo del cuarto ventrículo, formado por el tronco cerebral, tiene una forma que recuerda a ese adminículo. Según el médico romano Galeno (ca. 130-215), Herófilo fue el primero que inspeccionó dentro del cuarto ventrículo y que además describió su estructura.

Hoy en día se sigue empleando esta noción, pero solo para la punta de la estructura plumiforme. Y también sabemos para qué sirve el *calamus*: se ocupa de que el *liquor* —el líquido cerebral del que se produce casi medio litro diario en el interior del cerebro— pueda desaguar hacia el exterior para que no se produzca una hidrocefalia (el *liquor* puede llegar así finalmente a la circulación sanguínea). Esto sucede gracias a una apertura en la punta de la pluma de escribir: la apertura mediana del cuarto ventrículo. De todo esto Herófilo no llegó a saber probablemente nada.

EL CUARTO VENTRÍCULO

Si se extirpa el tentorio cerebeloso (*véase la figura de la derecha de la página 25*) y se saca el cerebelo de su nicho y se echa hacia delante, entonces se hace visible el cuarto ventrículo del tronco cerebral (*aquí en amarillo*). Se asemeja por su forma a una pluma de escribir, de ahí el nombre de *calamus scriptorius* de Herófilo. Destacadas en azul se encuentran las conducciones venosas.



Cerebro y cerebelo

También a los legos lo primero que les llama la atención cuando observan un cerebro es la división entre el cerebro dominante y el delicadamente estriado cerebelo situado en la parte trasera de la cabeza. Aristóteles (384-322 a. C.) había descrito 100 años antes que Herófilo estas dos estructuras, a las que denominó *enkephalon* y *parenkephalis*, pero solo en animales. Herófilo fue el primero en distinguirlas en el ser humano.

nombre: el torcular de Herófilo. Y, además, el nombre es un error de traducción. Un torcular es una prensa de tornillo para la fabricación de vino. Herófilo llamó a esta cavidad *lenos*, que se puede traducir efectivamente por «presa», pero también por «artesa» o por «depósito». Fue seguramente con estos dos sentidos últimos con los que Herófilo empleó dicho término: un recipiente para la sangre venosa. De todos modos, el torcular de Herófilo quedó excluido de la nomenclatura anatómica a finales del siglo XIX. La cavidad se llama ahora confluencia de senos (la reunión de las conducciones venosas).

Nuestro relato histórico avanza ahora hasta la supuesta escena final. En torno a 250 a. C. Herófilo, con sus buenos 80 años cumplidos, se encuentra en su lecho de muerte. Junto a él se halla Erasístrato, con unos 70 años, muy mermado en sus fuerzas. Durante toda su vida los dos han discutido acerca de si las arterias contienen solo espíritu vital aéreo (al que Erasístrato denomina pneuma) o portan también sangre (como piensa Herófilo).

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

HEROPHILUS OF CHALCEDON: AN ASSESSMENT OF HIS PLACE IN THE HISTORY OF ANATOMY. P. Potter en *Bulletin of the History of Medicine*, vol. 50, págs. 45-60, 1976.

HEROPHILUS: THE ART OF MEDICINE IN EARLY ALEXANDRIA. H. von Staden. Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

ANTIKE MEDIZIN: EIN LEXIKON. Dirigido por K. Leven. C. H. Beck, Múnich, 2005.

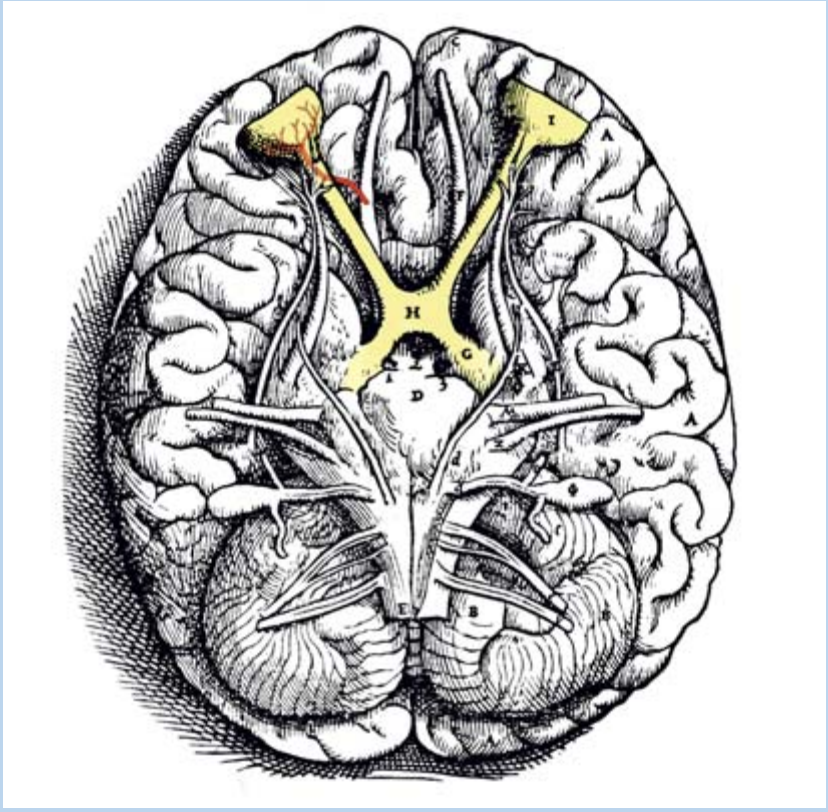
El cableado entre el cerebro y los ojos

Encontrar los nervios cerebrales no es algo sencillo, ya que se encuentran escondidos en la base del cerebro. Hay doce pares de ellos. Probablemente, Herófilo los vio todos, pero solo contó siete pares, porque juntó algunos nervios que los anatomistas actualmente separan.

A los nervios ópticos los denominó, según Galeno, *poroi*, que significa algo así como «conductos» o «tubos». La engañosa idea de que los nervios estaban huecos y que en ellos actuaba algún principio activo neumático o hidráulico se halla presente en los griegos mucho antes de la época de Herófilo. Esta hipótesis solo se superó en la época moderna, cuando se descubrió la excitabilidad eléctrica de los nervios, del cerebro y de los músculos.

De forma significativa, Herófilo únicamente utilizó el término *poroi* para los nervios ópticos y no para los restantes nervios cerebrales. Aquí Herófilo se mostró sorprendentemente clarividente, pues el nervio óptico es el único que posee en su interior una cavidad, a través de la cual la arteria central de la retina alcanza la retina ocular. Herófilo fue, además, el primero en describir de forma detallada el ojo con todas sus capas y venas.

Si Herófilo consiguió distinguir realmente esas cavidades, puede decirse que tenía muy buena vista. Pero entonces debió de llamarle la atención que la cavidad no llegara hasta el cerebro, pues la arteria penetra en el nervio solo en la proximidad del globo ocular. Por otra parte, esto es así únicamente en los adultos. Al principio del desarrollo embrionario, el nervio óptico está hueco en todo su recorrido, y su cavidad se comunica con el cerebro. Crece hacia afuera conjuntamente con el ojo a partir del cerebro, pues en último término los ojos y los nervios ópticos son evaginaciones del cerebro hueco. Posteriormente, desaparecen esos conductos y solo queda un mínimo resto, aquel en el que se encuentra la arteria central de la retina. Pero todo esto era imposible que Herófilo lo supiera, porque habría necesitado disponer de un microscopio. Quedaba mucho tiempo para que fuera inventado.



OBSERVADO DESDE ABAJO

La estructura resaltada en amarillo representa el nervio óptico y las partes posteriores de los ojos. Marcada en rojo se encuentra la arteria central de la retina, que se introduce en el nervio óptico de tal manera que en el último trozo de su recorrido pone de manifiesto una cavidad central: el canal para dicha arteria.

Tampoco en este momento se ponen de acuerdo. «¡Hazme la autopsia y mira!», gime finalmente Herófilo momentos antes de expirar. Erasístrato siguió su consejo, abrió el cadáver de su compañero y vio que las arterias casi no contenían sangre, que no tenían nada dentro, a excepción del pneuma, como él había afirmado.

Hoy en día sabemos que, tras la muerte, la sangre se acumula en las venas. Sus paredes son más finas y débiles que las de las arterias (algo que Herófilo ya había descubierto también). Aquí se embolsa la sangre tras la paralización de la circulación. Incluso las grandes arterias, como la aorta, poco después de la muerte solo contienen restos coagulados del jugo vital. Algunas veces no queda más remedio que echar un vistazo a los cuerpos vivos para descubrir la verdad.

Helmut Wicht *es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.* ***Hartwig Hanser*** *es bioquímico y jefe de redacción adjunto de* Spektrum der Wissenschaft.

ANATOMÍA

Médula espinal

La médula espinal no solo es capaz de realizar funciones autónomas de importancia principal. Sin su colaboración, el cerebro quedaría totalmente aislado

HELMUT WICHT

RESUMEN

Conexión global

1 La médula espinal se halla rodeada lateralmente por 31 pares de nervios espinales. Por ellos circulan las órdenes motoras a los músculos y ascienden las señales sensitivas del cuerpo hasta el cerebro.

2 La médula también utiliza la información con independencia del encéfalo para la ejecución de respuestas reflejas.

3 En las astas anteriores de la médula espinal se hallan las motoneuronas, células nerviosas responsables de los movimientos voluntarios.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 24

Cauda cerebri, «cola del cerebro», denominaban los anatomistas de la antigüedad a la médula espinal, para quienes dicho órgano no era más que una suerte de fantasma que flotaba en el cuerpo, incapaz de actuar y de sentir. Aislado de cualquier comunicación que le pusiera en contacto con el resto del organismo.

Situada en la columna y protegida por las vértebras que forman un canal óseo desde el cráneo hasta el sacro, la médula espinal libera al cerebro de la obligación de atender a los nimios asuntos cotidianos. Nos hallamos, sin duda, ante uno de los órganos más perfectos de la anatomía. En riguroso orden, siempre a la misma altura, de la columna vertebral emergen a derecha e izquierda 31 pares de nervios espinales que atraviesan unos orificios situados entre dos vértebras consecutivas. Estos nervios contienen las vías que transmiten las órdenes motoras a los músculos y reciben las señales sensitivas procedentes del cuerpo y las envían al sistema nervioso central.

Un rodeo

Al principio del desarrollo embrionario, la médula espinal ocupa la misma longitud que la columna vertebral. Pero, ya en una fase temprana, va retrasándose en su crecimiento, lo que obliga a los nervios espinales a dar un rodeo para llegar al sacro, antes de salir a un lado y otro de la columna. Este rodeo de los nervios es tanto más largo cuanto más abajo salen. Una vez terminado el crecimiento longitudinal, el extremo de la médula espinal se halla a la altura de la primera vértebra lumbar. El segmento de canal vertebral que queda por debajo está ocupado por las raíces de los nervios espinales procedentes de las regiones dorsal y sacra. En su conjunto se asemejan a una cola de caballo, de ahí su denominación *cauda equina*.

Del grosor de un lápiz, la médula espinal se encuentra protegida por unas finas membranas llenas de un líquido en cuyo interior está sumergida. Presenta dos pequeños abultamientos. Uno, conocido por engrosamiento cervical, se halla en la columna cervical, de donde surgen los nervios espinales que van a los hombros y los brazos; el otro, engrosamiento lumbar, se encuentra en el extremo inferior, de donde parten los nervios que inervan piernas, caderas y periné.

En un corte transversal, la médula espinal nos muestra una parte interior gris y otra superficial blanca. La forma de la parte central gris se asemeja a una mariposa. Contiene los somas celulares de las neuronas espinales. Acostumbran los anatomistas distinguir en esta parte gris las astas dorsal, ventral y lateral. Y, en pro de una clasificación más fina, subdividen las astas en doce áreas, con nom-

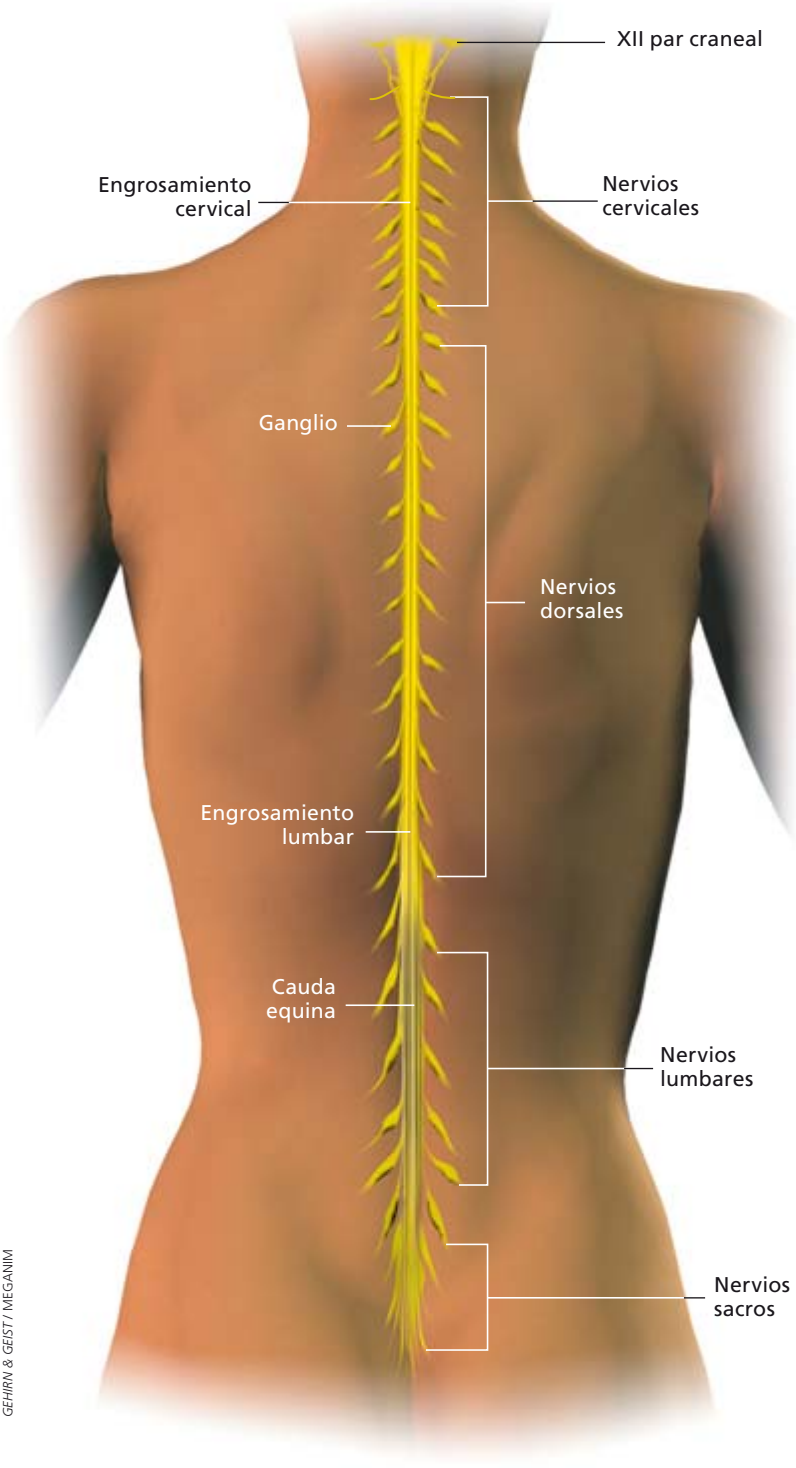
bres un tanto complejos, como el de núcleo retrodorsolateral (*nucleus retrodorsolateralis*; centro neuronal situado por detrás del núcleo dorsolateral).

La sustancia blanca externa está formada por fibras nerviosas que proceden en dirección ascendente y descendente y conectan cada uno de los segmentos de la médula espinal, de modo que quedan relacionados entre sí y con el cerebro. El sistema nervioso central puede así comunicarse con el resto del organismo a través de los nervios espinales. A su entrada en la columna vertebral, cada nervio espinal se ramifica, a semejanza del tronco de un árbol que extiende diversas raíces en el suelo. Basándose en este símil, se distingue una raíz posterior, que se dirige hacia la espalda (raíz dorsal), y una raíz anterior, que se dirige hacia delante (raíz ventral).

Animal de laboratorio

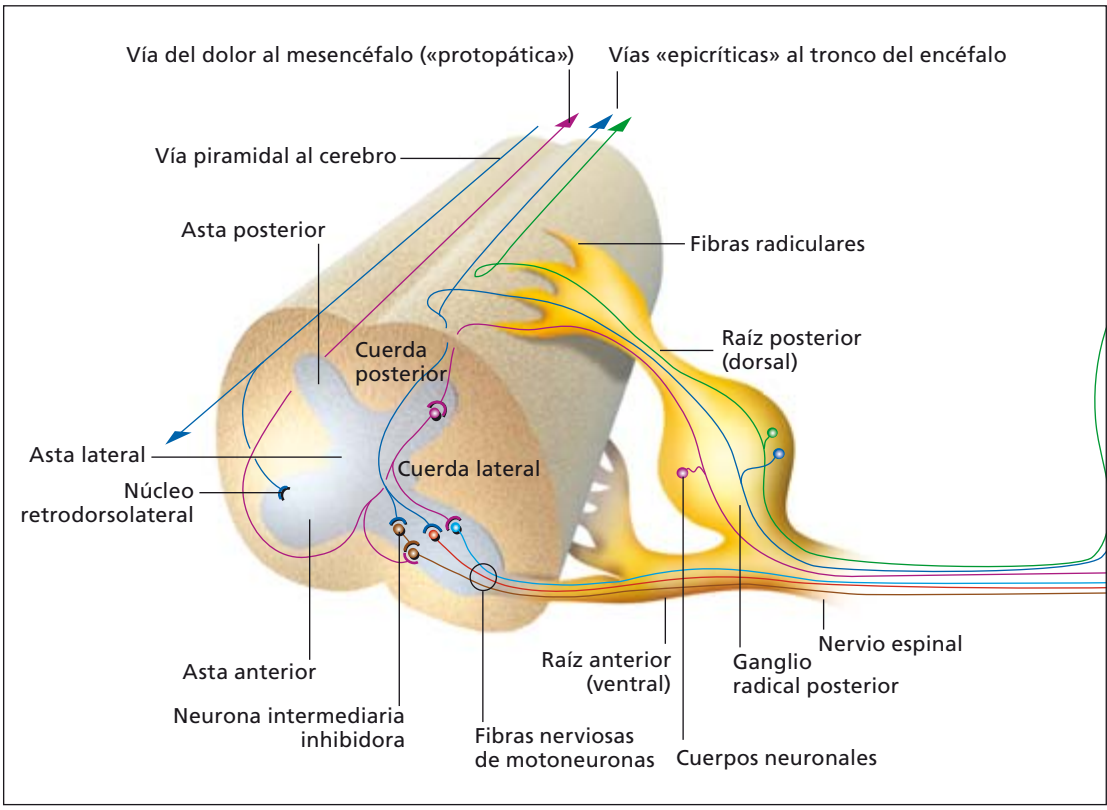
Estudiando estas raíces en un perro dio comienzo la moderna investigación experimental del sistema nervioso. El perro ocupa un papel protagonista. Sobre él trabajaron Charles Bell (1774-1842) y François Magendie (1783-1855), pioneros de la neurofisiología. Seccionaron, por una parte, las raíces anteriores y, por otra, las posteriores de los nervios espinales encargados de la inervación de las patas traseras. El resultado fue, en el primer caso, una incapacidad para la marcha; en el segundo, una insensibilidad. Así quedó claro que las raíces posteriores llevan señales al cerebro (son sensitivas), mientras que las anteriores conducen impulsos motores del cerebro a los músculos (son motoras).

La raíz posterior de cada nervio espinal, en el punto en que abandona la columna vertebral, presenta un engrosamiento nodoso: el ganglio de la raíz posterior. En su interior hay neuronas de las que parten fibras nerviosas en forma de T con un trazo vertical muy corto y un trazo transversal larguísimo, pues se extiende por todo el cuerpo y arriba a la piel y los músculos de los dedos de manos y pies. Allí entran en contacto con receptores de extensión (en los músculos) o con receptores de movimientos vibratorios o de cambios de presión (en la piel). Con frecuencia terminan también en los tejidos, registrando estímulos dolorosos o cambios de temperatura. Por la otra parte de los ganglios radicales posteriores, las fibras del trazo transversal de la T llegan a la parte posterior de la médula espinal, en la que penetran y se integran en la raíz posterior.



GEHRN & GEIST / MEGANIM

DE LA CABEZA AL SACRO PREPARADA PARA RECIBIR SEÑALES
Sin la médula espinal, el cerebro no sería capaz de percibir sensaciones ni ordenar movimientos, pues le faltarían las conexiones que le permiten comunicarse con el resto del cuerpo.



CONEXIONES ESPINALES
Estímulos procedentes de la piel, de los músculos y de los tendones llegan a la médula espinal y, a través de un arco reflejo, desencadenan reacciones motoras.

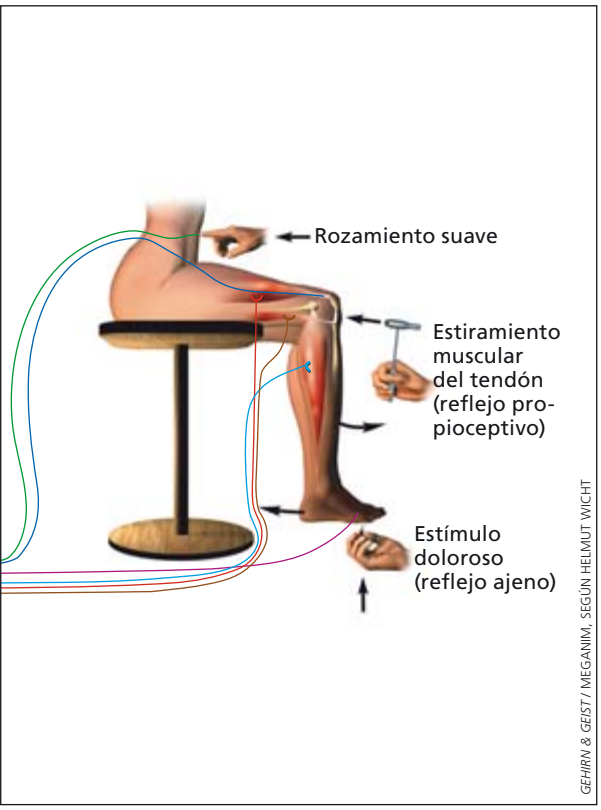
Algunas de estas fibras nerviosas ascienden directamente hasta el tronco del encéfalo, para constituir el cordón posterior; transmiten al cerebro sensaciones táctiles e información sobre la situación en que se encuentran nuestras articulaciones. A esas sensaciones se las reconoce como propias de la sensibilidad epicrítica. Viene a suponer una suerte de registro *en frío* de lo que en ese mismo momento está sucediendo, sin ningún tipo de componente emocional.

Algunas fibras nerviosas terminan en la sustancia gris del asta posterior, conectando con los somas celulares de otras neuronas, cuyas vías aferentes ascienden hasta el cerebro formando parte del cordón lateral de la médula espinal. A estas fibras se debe la experiencia de sensaciones menos agradables como temperatura, presión o dolor extremos. Los expertos califican tales sensaciones de sensibilidad protopática. Los investigadores de la médula espinal distinguen el sistema propioceptivo, que se ocupa de los reflejos, la posición de las articulaciones y el tono muscular, de otro sistema de rango superior, que asegura el intercambio informativo con el cerebro. La diferencia entre estos dos sistemas se pone de manifiesto cuando existe una parálisis espinal transversa, es decir, cuando una lesión interrumpe la comunicación entre la médula espinal y el cerebro. Mientras que la parte del cuerpo inferior a la lesión queda paralítica y sin sensibilidad, el sistema propioceptivo permanece intacto y los reflejos musculares que controla funcionan perfectamente.

El ejemplo más famoso de reflejo del sistema espinal propioceptivo es el desencadenado por un golpe de martillo en la rótula: el reflejo patelar. Este reflejo opera cuando la fibra nerviosa de una célula del ganglio de la raíz posterior lleva la noticia de que el músculo extensor del muslo ha sufrido, junto a su tendón, un súbito y fuerte estiramiento. Así acontece cuando el médico lo explora con su martillo de reflejos, pero también se da en la vida cotidiana cuando nos damos un golpe contra cualquier obstáculo.

E igual acontece en el perro si, al mover enérgicamente su cola como manifestación de alegría, golpea su rodilla. Si la articulación no se volviera a colocar inmediatamente en su debida posición extendida, el perro se caería. Las neuronas motoras del asta anterior son estimuladas por las fibras nerviosas procedentes del asta posterior y dan la orden de contraer el músculo distendido. En consecuencia, la rodilla se extiende, el perro queda de pie y puede seguir moviéndose.

Para ello se requiere una condición: que no se contraigan simultáneamente los músculos flexores y que los dos grupos musculares no



GEHIRN & GEIST / MEGANIM, SEGÚN HELMUT WICHT

ejerzan acciones antagónicas. Salen al paso del animal ciertas ayudas de los ganglios de las raíces posteriores, que ejercen una función inhibidora, para que el arco reflejo espinal funcione perfectamente.

Los expertos hablan en estos casos de un reflejo propioceptivo, porque en el mismo órgano (el músculo extensor de la rodilla) se produce el estímulo (el estiramiento) y se desencadena el reflejo. En un reflejo ajeno participan, en cambio, diversos órganos; pensemos, por ejemplo, en lo que sucede si sufrimos un pinchazo en la planta del pie. En este caso actúan todos los músculos flexores del miembro inferior para llevar el pie a una posición segura. El proceso se desarrolla de forma involuntaria, antes incluso de aparecer un dolor consciente. El pinchazo se ha producido en la piel, pero ha reaccionado toda la musculatura del miembro inferior. El desencadenamiento de este reflejo de flexión se asemeja al patelar, aunque ahora se estimulan grupos enteros de neuronas motoras del asta anterior a través de neuronas intermedias.

Evolución y reflejos

Este reflejo pone de manifiesto que la evolución no contaba con el descubrimiento de las tazas de café. Cuando tocamos una taza de café excesivamente caliente se activan todos los músculos flexores, incluidos los de los dedos, en virtud de un reflejo ajeno. El resultado indeseado es que el objeto, del que realmente nos queremos librar, se aprehende al principio más firmemente. En el caso de un animal, sin capacidad para asir la taza, el automatismo adquiere pleno sentido, porque la extremidad afectada se retira de inmediato y se coloca a resguardo. Todo apunta a que este reflejo procede de una remota época en la que todavía no había aparecido una mano prensil.

De manera colateral hemos aprendido para qué sirven las astas anteriores de la médula espinal. En ellas se encuentran los somas celulares de las neuronas responsables de los movimientos voluntarios: las motoneuronas. Por las raíces anteriores transcurren las fibras correspondientes. También aquí vuelve a presentarse un orden escrupuloso: las motoneuronas que inervan los músculos del tórax, situados muy cerca, se encuentran en el centro de las astas anteriores. Sin embargo, las que inervan los alejados músculos de la mano y del pie tienen una posición más externa, en el núcleo retrodorsolateral, antes aludido.

Con su ayuda, he tecleado el presente artículo en el ordenador. Pero no hubiera podido hacer nada sin el cerebro. La médula espinal se ocupa de que, al teclear, los músculos flexores y extensores de los dedos no estén constantemente contraídos y de que actúen de forma coordinada; también, de que, una vez movidos, vuelvan a la posición original. Para movimientos más complejos, así la búsqueda de un signo especial, se necesita el cerebro. A través de un apretado paquete de fibras nerviosas situado en la parte anterolateral de la médula espinal, el cerebro envía sus instrucciones a las motoneuronas, formando la vía piramidal cuyo destino principal vuelve a ser el núcleo retrodorsolateral.

Vista en su conjunto, resulta admirable la autonomía de la médula espinal. Una determinada red neuronal gobierna de forma autónoma los movimientos rítmicos de la marcha, lo que nos permite evitar tropiezos constantes. Otras redes neuronales se encargan de la fundamental misión de utilizar los órganos del bajo vientre para la evacuación o la reproducción. En principio, todo eso podría funcionar perfectamente sin contar con el cerebro, pero no nos daríamos cuenta.

Helmut Wicht *es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

ANATOMÍA

Nueva consideración de los nervios

Los hay en forma de cordones. A unos se les alteran, a otros se les tensan hasta la iracundia. Quien los tiene de acero, no los pierde con facilidad. ¿Qué son, en realidad, los nervios?

HELMUT WICHT

RESUMEN

Redes nerviosas

1 Las neuronas y las células de la glía son unidades fundamentales del sistema nervioso. Mientras que las primeras reciben y transmiten impulsos nerviosos, las segundas actúan como elementos de apoyo.

2 Existen tres grandes clases de células de la glía en el sistema nervioso central: los oligodendrocitos, los astrocitos y las microgliales.

3 El sistema nervioso se compone de una parte central (cerebro y médula espinal) y una parte periférica.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 19

Todavía resuenan los ecos de la disputa entre «reticularistas» y «neuronalistas». Asociaban los primeros el funcionamiento del sistema nervioso a una red de distribución, semejante al tendido eléctrico; por entonces se conocía ya que la transmisión de información, incluida la del sistema nervioso, guardaba relación con corrientes eléctricas. Los neuronalistas, por el contrario, se imaginaban una especie de juego de construcción por módulos: las células constituían una suerte de vagones de tren enganchados entre sí y, sin embargo, nítidamente diferenciadas. Los segundos ganaron la partida.

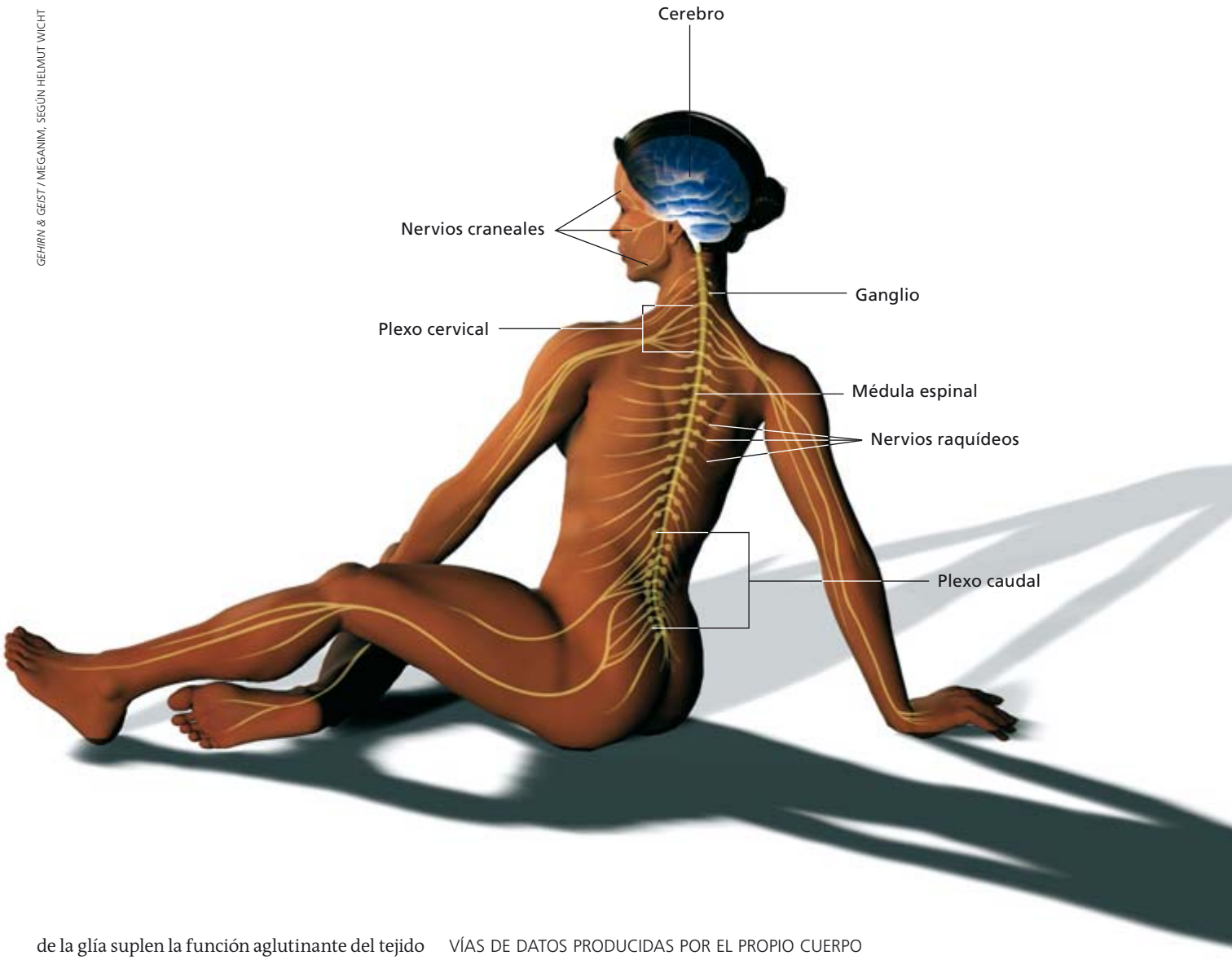
El sistema nervioso consta de células, las neuronas, que en parte forman prolongaciones muy largas, los axones o neuritas. Los axones de las del nervio ciático, que va de la médula espinal a la planta del pie, alcanzan una longitud de más de un metro. Impresionante, si tenemos en cuenta que el diámetro del soma celular del que arrancan mide solo unas cuatro centésimas de milímetro.

Por regla general, cada célula nerviosa posee un axón, que termina en una estructura arborescente. En las puntas de las ramitas se asientan botones terminales, que se insinúan en otras células nerviosas para entablar contacto, las sinapsis. Allí, una hendidura de unos 20 nanómetros separa las neuronas. ¿Cómo consiguen las señales eléctricas superar ese hiato? La química aporta la respuesta. Los botones liberan neurotransmisores en el momento oportuno. Tales sustancias mensajeras modifican el estado eléctrico de las células conectadas; la información puede continuar su camino.

La mayoría de las células nerviosas tienen, además del axón, otras prolongaciones más cortas y romas, mucho más ramificadas también. Hablamos de las dendritas. Igual que el soma celular, hacen de estaciones receptoras, pues aquí suelen asentarse miles de botones de otras neuronas. Si los botones liberan de preferencia neurotransmisores estimuladores, se origina en las células conectadas un pulso eléctrico, que, a través del axón, llega a las neuronas inmediatas o a los músculos. Los neurotransmisores inhibidores impiden esa reacción.

Órgano deformable

El sistema nervioso no consta solo de neuronas. Los vasos sanguíneos aportan sin cesar al cerebro oxígeno y nutrientes en cuantía suficiente. Pero ni en el cerebro ni en la médula espinal encontramos tejido conjuntivo, que dota de firmeza a nuestro cuerpo. El encéfalo presenta la consistencia de un pudín, tan blando que pierde su forma en cuanto se le extrae de la caja craneana. Sin embargo, en vez de tejido conjuntivo, el sistema nervioso posee un tipo muy especial de células: la glía. Hasta cierto punto, las células



GEHIRN & GEIST / MEGANIM, SEGÚN HELMUT WICHT

VÍAS DE DATOS PRODUCIDAS POR EL PROPIO CUERPO

Los nervios más importantes son los craneales, que parten del cerebro, y los nervios raquídeos, que salen de la médula espinal. Estos últimos forman redes o plexos, como el plexo cervical en la zona de los hombros y el plexo caudal en la región lumbar. Tras salir de la médula espinal se intercalan, además, grupos de somas celulares (ganglios) en las vías conductoras.

de la glía suplen la función aglutinante del tejido conjuntivo. Su mismo nombre significa «liga» o «engrudo de nervios». Se le reconoce también una función central en la transmisión de señales; para algunos autores, más importante que la desempeñada por las neuronas.

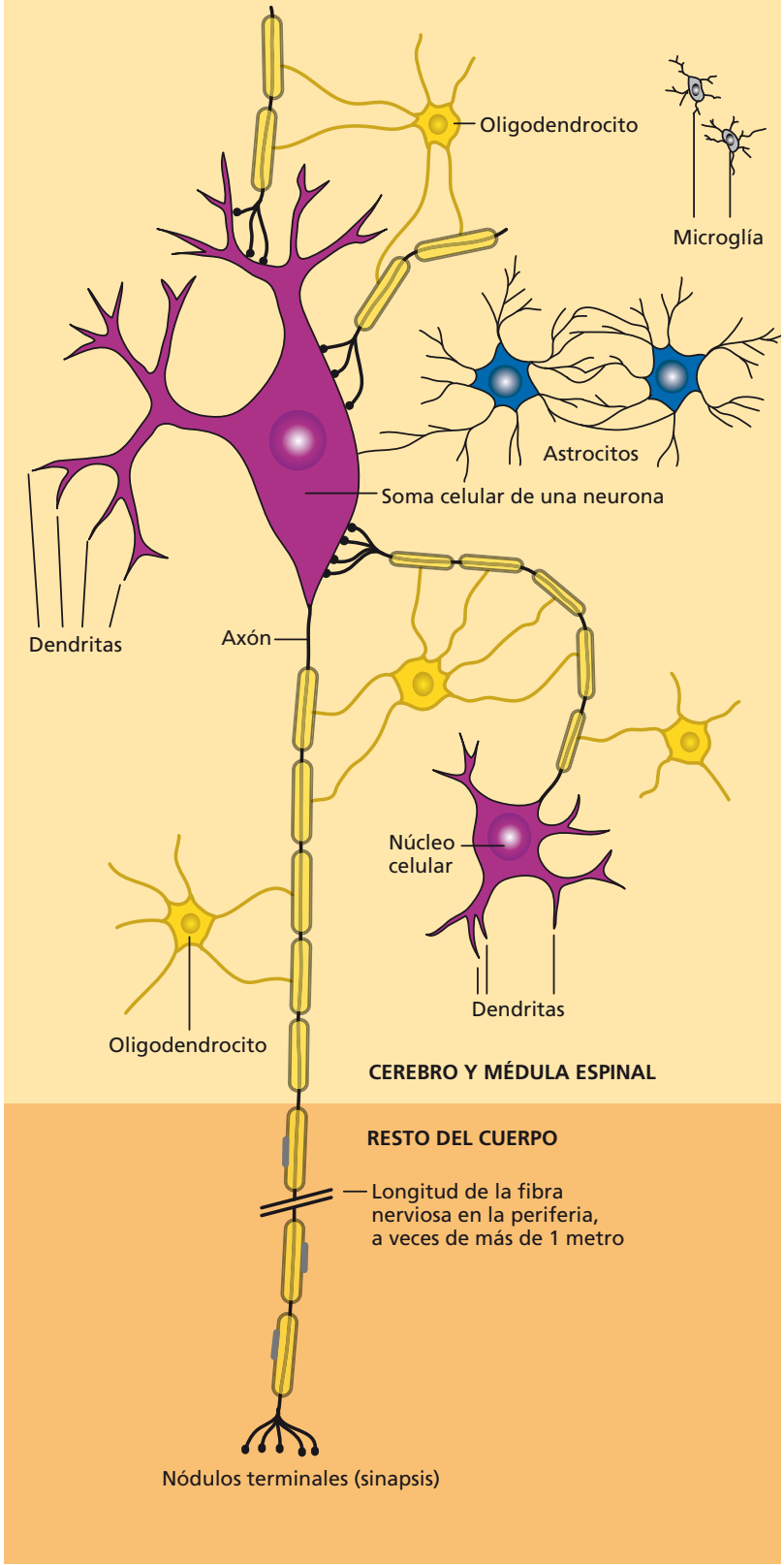
Se distinguen tres grandes clases de células de la glía. Conforman la primera células gliales que aíslan eléctricamente de su entorno a los axones. Solo en muy contados casos los axones se hallan *desnudos*; lo normal es que, aislados o en grupos, estén envueltos por células de la glía. Por eso se denomina al conjunto una fibra nerviosa. En el sistema nervioso central, el oligodendrocito (una célula glial) puede verse implicado en varias fibras nerviosas; en el sistema nervioso periférico, la célula de Schwann produce siempre una única envoltura.

Hay, además, células gliales que están muy ramificadas. Se parecen a neuronas ricas en dendritas, aunque sin axón. Por su aspecto estrellado se las denominó astrocitos. Estas células transportan nutrientes desde los vasos sanguíneos a las neuronas y mantienen un delicado equilibrio eléctrico de los iones, imprescindibles para la función nerviosa. Algunos astrocitos eliminan los neurotransmisores *amortizados*, para que las neuronas no se ahoguen en sus propias moléculas de señal.

Los astrocitos, además de ser eléctricamente activos, tienen también entre ellos una conexión eléctrica directa; merced a esa peculiaridad, los estímulos más o menos lentos se propagan a través de grandes distancias. Forman, de hecho,

COMPONENTES CON PROLONGACIONES

Solo en el curso de los últimos cien años se ha podido identificar cada uno de los elementos que componen el cerebro y los nervios, y describirlos con detalle.



GEHIRN & GEIST / MEGANIM

una red eléctrica ininterrumpida. Se ignora qué significado encierra ello para la función cerebral. Tal vez los astrocitos influyen de ese modo en la actividad neuronal de muchas zonas del cerebro.

El tamaño y su óptica

Por último, están las células de la microglía, que en el resto del cuerpo constituyen células macrófagas. Lo de micro y su antagonista macro depende del punto de comparación. En el organismo, los macrófagos parecen enormes en comparación con las células que les rodean; pero al lado de las neuronas, que son mucho mayores, dan la impresión de minúsculas. Las neuronas son, tras los óvulos femeninos, las células más grandes del organismo humano; algunas pueden percibirse a simple vista o, al menos, con una lupa de pocos aumentos. En el cerebro, las células de la microglía realizan una operación distintiva de los macrófagos: recogen lo inútil o lo que parece sospechoso y se lo presentan a los linfocitos. Las células de la microglía forman parte del sistema inmunitario.

Dejemos en este punto el dominio celular y abordemos la estructura macroscópica del sistema nervioso. De entrada cuenta con la ventaja de ser perceptible a simple vista. Consta de una parte central —cerebro y médula espinal— y una parte periférica. Esta última abarca el tejido nervioso que no está encerrado en el cráneo ni en la columna vertebral.

Cuando los primeros naturalistas se pusieron a descifrar para qué servían los nervios, empezaron por buscar desde dónde partían. Aristóteles (384-322 a. C.) situaba en el corazón el centro de sensaciones y voliciones; por tanto, debían nacer también allí los nervios. Lo creyó pese a haber diseccionado animales y, sin duda, observar su relación con el cerebro y la médula. Quedó para Herófilo de Calcedonia (330-250 a. C.) la primacía de fijar el correcto origen de los nervios.

Reconocemos dos conjuntos de nervios. El primero consta de 12 nervios craneales; el segundo, de 32 nervios raquídeos o espinales. Cada uno de estos nervios aparece duplicado: uno va al hemisferio izquierdo del cuerpo y el otro al derecho. Los anatomistas acostumbran a numerarlos de delante a atrás: nervios craneales I-XII; nervios raquídeos I-XXXII.

En realidad, la situación es algo más compleja. A los nervios craneales se les conoce también con el nombre del órgano de destino; por ejemplo, nervio olfatorio (I), nervio óptico (II), nervio auditivo o estatoacústico (VIII), etcétera. Los legos están menos familiarizados con otros

nervios; por ejemplo, el *nervus terminalis* (muy atrofiado en los humanos), el cual se encuentra por delante del nervio olfatorio; por eso los anatomistas lo bautizaron como nervio craneal cero. Añádase que los nervios, sobre todo los espinales, pueden formar mallas o plexos. Los nervios raquídeos que entran en las mallas llevan números; los que salen de ellas, nombres (así, *nervus ischiadicus* o nervio ciático).

Pero historia y nombres aparte ¿qué es un nervio? A grandes rasgos, un haz de fibras nerviosas recubiertas de glía. Estas terminaciones de las neuronas en fibras pueden ser sensoras, que dotan al cerebro y a la médula espinal de informaciones del resto del cuerpo, y motoras, que ponen en funcionamiento a músculos o glándulas.

Las fibras motoras, cuyo soma neurocelular se sitúa en los nervios espinales, pueden penetrar con un nervio espinal de la región lumbar, muy arriba, en el plexo de la pierna y volver a salir del plexo, bastante abajo, junto con el nervio ciático. Por eso, en el prolapso de un cartílago intervertebral (porción superior de la columna vertebral lumbar), que presiona a esas fibras, los músculos (abajo, en la pierna) ya no colaboran.

Ganglios

Junto al neuroplexo, en el sistema nervioso periférico, se hallan ocasionalmente unos nódulos, los ganglios, que se intercalan a lo largo de los nervios. Alojan grupos de somas neurocelulares. Se tardó mucho en descifrar la función de los ganglios: los hay de dos tipos, que cumplen tareas distintas, aunque externamente se confunden.

Un primer tipo de ganglios se halla en ciertos nervios craneales y en todos los nervios raquídeos. Estos nódulos nerviosos están al servicio de la transmisión de los impulsos sensoriales al sistema nervioso central.

Los ganglios del segundo tipo forman parte del sistema nerviosos involuntario o autónomo, que gobierna los músculos y glándulas que no se encuentran sujetos a nuestra voluntad: los músculos del intestino y de las paredes de los vasos sanguíneos, las glándulas salivales, etcétera. Aunque los ganglios están dirigidos por el sistema nervioso central, no lo están directamente como en los músculos voluntarios, sino a través de las neuronas intersticiales.

Helmut Wicht es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

SciLogs

Ciencia en primera persona

Marc Boada Ferrer
Taller y laboratorio 2.0

Yvonne Buchholz
Psicología y neurociencia al día

Joshua Tristancho Martínez
Misiones espaciales low-cost

José María Valderas
De la sinapsis a la conciencia

Ángel Garcimartín Montero
Física y sociedad

Cristina Manuel Hidalgo
Física exótica

Claudi Mans Teixidó
Ciencia de la vida cotidiana

Luis Cardona Pascual
Ciencia marina

Y más...

www.investigacionyciencia.es/blogs

ANATOMÍA

Tallo cerebral

El tronco encefálico actúa de nudo central de comunicaciones del sistema nervioso: conecta el cerebro con la médula espinal, el encéfalo con el cerebelo y, además, mantiene nuestro organismo en funcionamiento

HELMUT WICHT

RESUMEN

Pequeño centro técnico

1 Pese a su tamaño reducido, del tronco encefálico dependen todas las demás partes del sistema nervioso. Sin él no funciona nada.

2 La superficie dorsal del tronco del encéfalo se halla recubierta en gran parte por los hemisferios cerebrales y el cerebelo.

3 En torno al tallo cerebral se hallan los pares craneales, nervios periféricos del encéfalo.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 23

¿Ha intentado alguna vez partir una nuez y sacar el fruto de la cáscara? No es tan fácil. La cáscara es dura, el fruto blando y quebradizo y, además, están esos tabiques leñosos, que arrancan de la cáscara y separan partes del fruto. Con problemas muy similares pugna el anatomista que trata de extraer entero el cerebro de un cráneo. Todo es angosto, el hueso duro como la piedra y blanda la masa cerebral. Lo mismo que en la nuez, hay tabiques resistentes y pergaminosos entre los lóbulos del cerebro. Nos referimos a los septos que forman parte de la meninge, la *duramater* (duramadre).

Cuando el anatomista ha puesto al descubierto el cerebro, opera dos cortes, que dividen el órgano en tres partes. El escalpelo empieza por el durasepto posterior, en el llamado *tentorium* o tienda del cerebelo. El anatomista separa el encéfalo del resto. Aísla después el cerebelo (fácil de reconocer por sus finas sinuosidades).

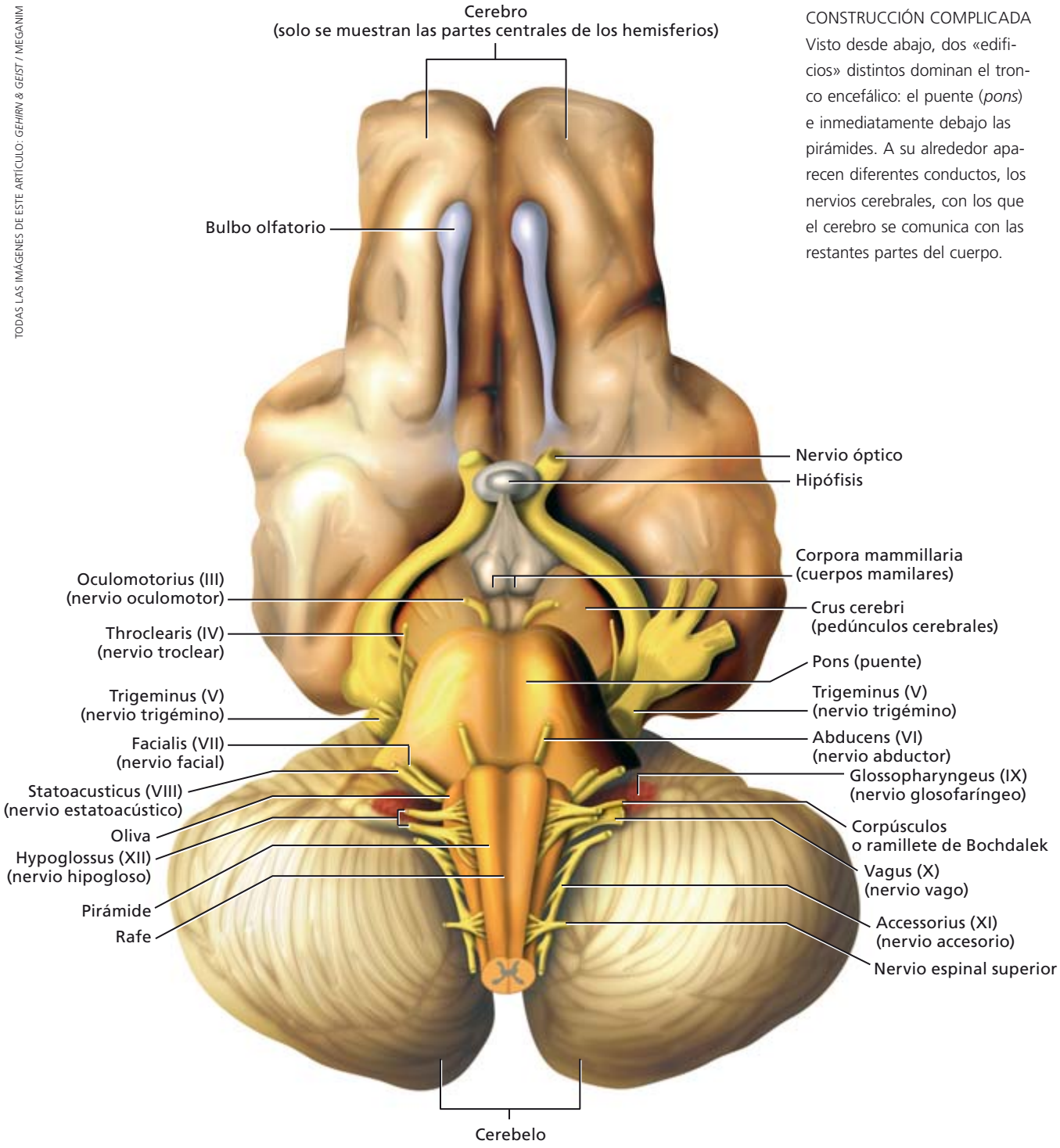
Lo que queda es la parte central del cerebro, que originariamente se hallaba en la incisura de Pacchioni y conectaba entre sí todo: la médula espinal con el encéfalo y, allí, el cerebro con el cerebelo. Esta estructura, del tamaño de un dedo pulgar, recibió ajustadamente el nombre de *truncus cerebri*, tallo o tronco encefálico. De él dependen todas las otras partes del sistema nervioso, como penden las ramas del tronco de un árbol.

Una cosa debería quedar clara: sin el tallo no funciona nada. Amén de conectar entre sí todos los centros neuronales de mando, desempeña funciones de central técnica, por donde pasan todos los conductos de abastecimiento y se alojan las máquinas, bombas, reguladores y generadores, que mantienen funcionando el establecimiento. Allí encontramos los nervios craneales con los que nos comunicamos con el resto del mundo. Visto desde abajo, el tronco encefálico parece una Y, que se recubre de una gran U invertida. Los brazos de la Y son los pedúnculos cerebrales (*crura cerebri*). Están formados por fibras nerviosas que provienen de la corteza cerebral.

Esta estructura debió estimular la fantasía de los neuroanatomistas de primera hora, varones casi en exclusiva. Con algo de imaginación se puede reconocer aquí un *collage* de rasgos sexuales femeninos, solo que en el lugar que ocuparía el pubis entre los muslos se sitúan los cuerpos mamilares, en latín *corpora mammillaria*, dos llamativas estructuras semiesféricas.

Junto a ellas aparece, a ambos lados, el tercer nervio craneal, responsable de la mayoría de los músculos ópticos. Tras los cuerpos mamilares

TODAS LAS IMÁGENES DE ESTE ARTÍCULO: *GEHIRN & GEIST* / MEGANIM

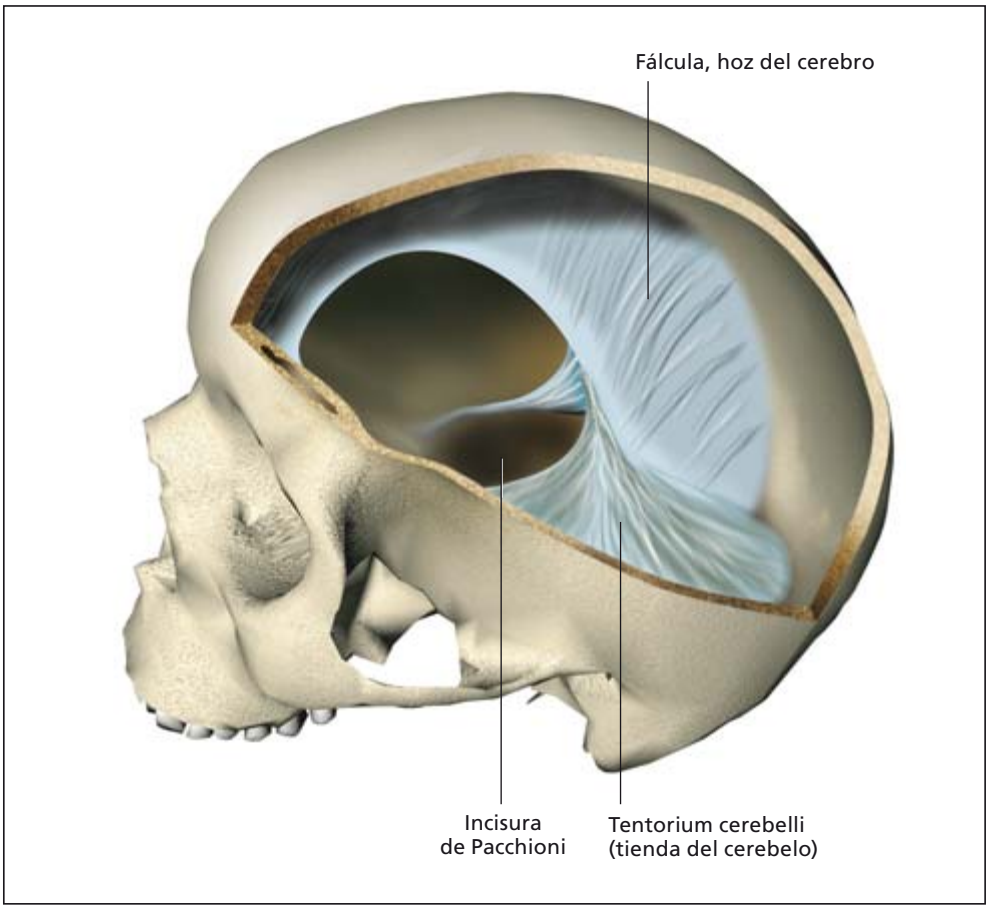


CONSTRUCCIÓN COMPLICADA
Visto desde abajo, dos «edificios» distintos dominan el tronco encefálico: el puente (*pons*) e inmediatamente debajo las pirámides. A su alrededor aparecen diferentes conductos, los nervios cerebrales, con los que el cerebro se comunica con las restantes partes del cuerpo.

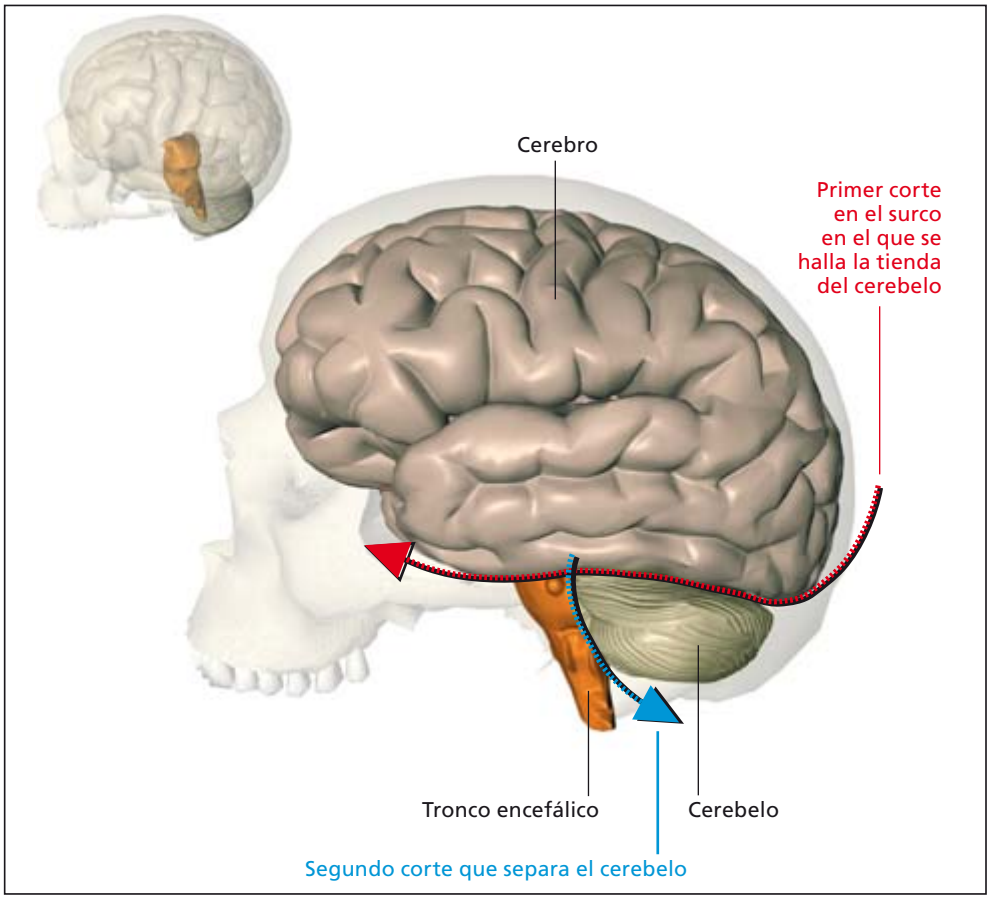
desaparecen los muslos de la Y debajo de la U invertida, que, como una amplia pinza, sujeta el cerebelo al tronco encefálico. Esta estructura debe su nombre a su forma: puente, en latín *pons*. A su lado emerge el quinto nervio craneal, el trigémino, competente en parte de la transmisión de señales en la zona de la cabeza. Con su ayuda podemos masticar y tragar, pero también sufrir un dolor de muelas o una bofetada.

Estrechamiento

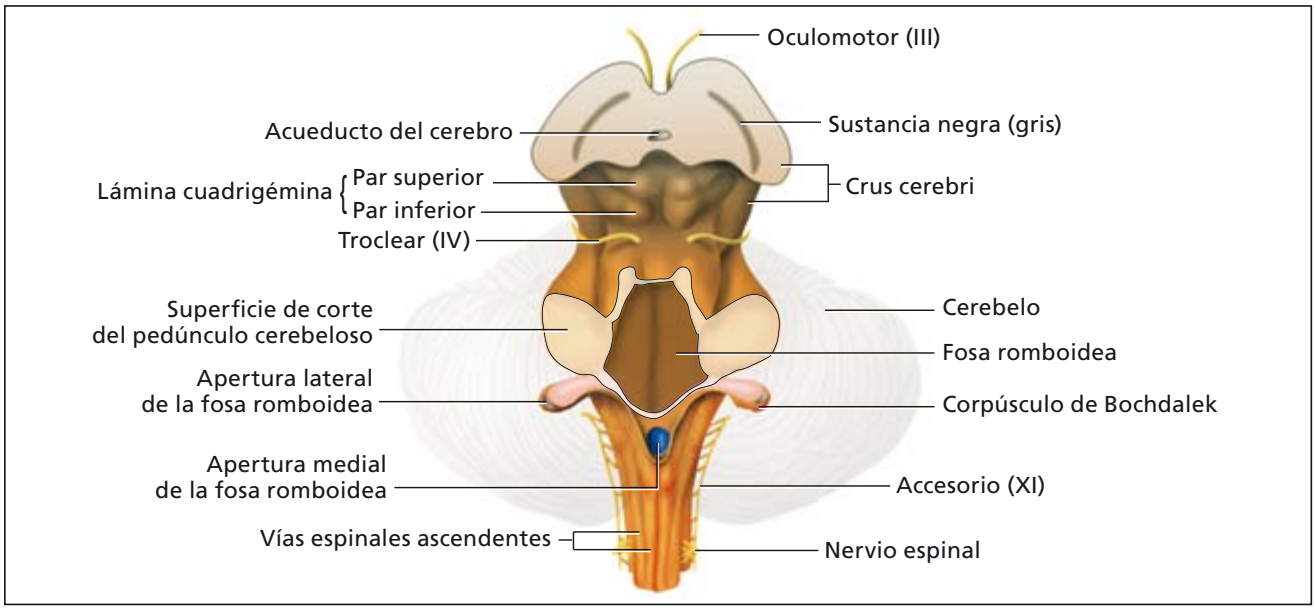
Si nos dirigimos desde el puente en dirección a la médula espinal, la descripción resulta un tanto complicada. En una angosta comisura entre el cerebelo y el puente se aprietan, uno junto a otro, cinco nervios craneales: uno es competente en el sabor y en la mímica (facial), otro en la audición y el sentido del equilibrio (estatoacústico), otro en la deglución (glosofaríngeo) y otro



NUEZ CASCADA
Los tabiques durales penetran profundamente en el espacio intracraneal: como fálcula entre ambos hemisferios cerebrales y como tienda del cerebelo (*tentorium cerebelli*) entre el cerebro y el cerebelo.



TRÍADA ANATÓMICA
Después de dejar al descubierto un cerebro, el anatomista suele dividir, con dos cortes, la pieza en tres partes. El primer corte penetra en el surco en el que se halla la tienda del cerebelo; el segundo separa el cerebelo del tronco encefálico.



TERRENO MONTUOSO CON CRÁTERES
Si se contempla el tronco encefálico desde abajo, llama la atención, al principio, sobre todo la lámina cuadrigémina o lámina del techo del mesencéfalo (*arriba*) y el gran agujero abajo, la fosa romboidea. En la superficie del corte se ve un canal profundo, el *Aquaeductus cerebri*; desemboca en la fosa romboidea.

responsable de los dos músculos del cuello y la nuca (accesorio). Está, además, el nervio vago, que, como parte principal del sistema nervioso autónomo, desempeña un número increíble de funciones: desde el control de la laringe en la locución hasta la regulación de la actividad de los órganos internos.

Por si todo esto no fuera suficiente, se acomoda otra estructura en el ángulo pontocerebeloso. Se parece a un minúsculo y apretado ramillete de diminutas floraciones; por eso se le llama también ramillete o corpúsculos de Bochdalek, en recuerdo del anatomista checo Vinzenz Alexander Bochdalek (1802-1883). En las preparaciones cerebrales en formol que es obligatorio contemplar en cualquier muestrario de anatomía, recuerda la figura de un brécol podrido, marchito y gris. Sin embargo, en el cerebro vivo es de un rojo intenso, merced a su notable irrigación. A esa estructura le cumple producir la neurolinfa o líquido cefalorraquídeo (*liquor cerebrospinalis*) en el que flotan el cerebro y la médula espinal.

Hacia el centro, el espacio se ensancha. De ello se beneficia el sexto nervio cerebral, el abductor, que solo se ocupa de un músculo ocular. Además, aparecen aquí dos columnas finas debajo del puente que llegan hasta la médula. Algún aficionado a la arqueología egipcia les puso el nombre de pirámides, y así ha quedado. En realidad presentan forma de obelisco. En las fibras nerviosas que pasan por tales columnas se dirigen los impulsos motores desde la corteza cerebral hacia la médula espinal; constituyen lo que se llama la vía piramidal o vía motora voluntaria.

La mayoría de estas fibras se pasan, en el extremo inferior de la pirámide, al lado contrario. Lo cual explica por qué, después de un ataque de aplopejía en el hemisferio cerebral derecho, se paraliza la parte izquierda del cuerpo, y a la inversa. Estos cruzamientos derecha-izquierda se dan también en muchos otros lugares del sistema nervioso central. Sobre el sentido profundo del cruce especulan los anatomistas. Después de todo, las vías nerviosas funcionarían igual sin cruzarse.

A los lados de la pirámide hallamos el duodécimo nervio cerebral, el hipogloso, que inerva el músculo de la lengua. Descendiendo, saldrían al paso los nervios espinales. Junto al hipogloso sobresale una larga estructura oval. Como en el caso del ramillete de Bochdalek, un anatomista la asoció también con la flora y la bautizó oliva. Para ser más preciso, la oliva inferior, pues hay otra superior, pero esta reside escondida dentro del tallo encefálico, debajo del puente.

¿Centro de la felicidad obsequiosa?

En la línea central del tronco encefálico, entallada profundamente entre las pirámides, discurre una sutura vertical, el rafe. Debajo, en el tejido nervioso, se encuentran los núcleos del rafe. Se trata, según los casos, de los centros cerebrales de la felicidad o de la infelicidad: sus largas y muy ramificadas fibras nerviosas se extienden por

casi todo el sistema nervioso; muchas de ellas terminan en la corteza cerebral. Allí distribuyen en abundancia el mensajero serotonina. Pero si se consumen todas las provisiones de serotonina o se dañan las células, el estado eufórico de ánimo se torna en abatida depresión.

Hasta ahora solo hemos explorado el tronco encefálico desde abajo. Si se le da la vuelta, se distingue entre los pies de los pedúnculos cerebrales (*crura cerebri*) y, bajo ellos, una lámina de la que destacan cuatro protuberancias: la lámina cuadrigémina. Las dos elevaciones superiores se relacionan con la vista, las dos inferiores con el oído.

En contra de un prejuicio muy extendido, la corteza cerebral no posee el monopolio de todas las percepciones sensoriales, sino solo de las conscientes. Se comprueba en las personas que quedan ciegas a causa de una lesión de la corteza visual primaria. Si de repente se mueve algo en el campo visual de un afectado, este dirige sus ojos automática e involuntariamente hacia el estímulo, aunque declara con seguridad que no ve nada. Un fenómeno análogo sucede con el oído. Estos reflejos visuales y acústicos vienen mediados por el par superior e inferior, respectivamente, de los tubérculos cuadrigéminos. Detrás de este último par aparece, además, otro nervio cerebral, el troclear. De finura sutil, inerva un solo músculo del ojo.

Después viene un gran orificio. Apareció cuando el anatomista separó, con el segundo corte, el cerebelo de los pedúnculos que lo unían al tronco cerebral. Hay que tener en cuenta, además, que el cerebro está hueco por dentro. Este orificio forma parte, pues, de su cavidad interior. Adquiere una forma rómbica; de ahí su denominación de fosa romboidea (*fossa rhomboidea*).

Detrás, y al lado, se distingue una fina membrana, prolapsada hacia fuera en el ángulo pontocerebeloso. Se trata, otra vez, del ramillete de Bochdalek. A través de los orificios de esa membrana, la cavidad interna se conecta con el espacio circundante. Estos orificios son sobremanera importantes, pues, si se obstruyen —y esto sucede a veces—, ya no puede fluir el líquido cefalorraquídeo. En este caso, el líquido se estanca en el interior del cerebro y, por así decirlo, se hincha. En consecuencia, se produce la temida hidrocefalia.

Nuestro recorrido aún no ha concluido. Volviendo en dirección a la médula espinal, se distinguen, en la parte inferior del tronco encefálico, unas estructuras columnares, parecidas a las pirámides. Por aquí no pasa ninguna fibra nerviosa motora, sino vías de informaciones sensoriales que provienen de la médula espinal.

Viaje al interior del tronco encefálico

Nos hemos limitado a la superficie del tronco encefálico. Pero ¿qué aspecto tiene su estructura interna? Por un lado, encuentran albergue todos los grupos posibles de células nerviosas: motores, de los que se originan los componentes de los nervios cerebrales que son competentes en los movimientos; sensibles, los que llegan a las fibras sensoriales; amén de otros asociados a la distribución de información.

Algunos conductos se limitan a pasar por el tronco encefálico; otros se encaminan, a través de nudos de conexión, hacia diferentes destinos. Entre tales relés sobresale la sustancia negra (*substantia nigra*), cuya lesión provoca los síntomas de la enfermedad de Parkinson [*véase* «Enfermedad de Parkinson», por Konrad Schmidt y Wolfgang Oertel; Mente y cerebro, n.º 18].

En último lugar, pero no por eso menos importante, hallamos la formación reticular (*formatio reticularis*), la estructura principal del tallo. En algún aspecto semeja una porción de queso emmental, en el que el lugar de los agujeros lo ocupan grupos de células nerviosas claramente diferenciables al microscopio. Todo el resto —el océano neuronal que rodea a esta isla— es la formación reticular.

Allí advienen ramificaciones desde todos los sistemas neuronales, aun cuando sus conductos den la impresión de tomarlo por zona de mero tránsito. Nada tiene de sorprendente que se desarrolle en su seno todo lo básico y fundamental. Se genera el ritmo respiratorio, se adapta la frecuencia cardíaca, se regula la presión sanguínea y la fuerza muscular global; en pocas palabras: aquí reside la central técnica.

No se trata, empero, de un espacio holgado. Los tabiques durales se juntan aquí y forman la incisura de Pacchioni. Tan estrecho es el emplazamiento, que podría incluso pinzarse el tronco encefálico bajo la presión de un hematoma o una tumefacción, cuyas consecuencias, con un riego sanguíneo estrangulado, podrían desembocar en la muerte. Por eso, ante la sospecha de una conmoción cerebral, que, en principio, siempre puede producir un hematoma o una tumefacción, rige la máxima de acudir presto al hospital para una observación inmediata.

Helmut Wicht *es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

ANATOMÍA

Estructuras del **diencéfalo**

El diencéfalo designa la zona entre el tronco cerebral y el cerebro. Su núcleo, el tálamo, actúa de *puerta de la conciencia*. A menudo se comporta de forma caprichosa

HELMUT WICHT

El término tálamo, de suave sonoridad, deja entrever la belleza vocálica del griego clásico. El concepto es mucho más antiguo. En el Egipto de los faraones designaba el vestíbulo de un templo. Los primeros anatomistas denominaron tálamo a un estrecho hueco, lleno de líquido cefalorraquídeo, sito en el centro del diencéfalo. Hoy llamamos a esa hendidura ventrículo cerebral; para los puristas, tercer ventrículo cerebral.

Hasta hace escasas centurias, creíase que el líquido de esa cavidad portaba las funciones cerebrales. Dominaba la opinión de que ese «humor» confluía, desde todas las partes del encéfalo, en el tálamo. Por eso, René Descartes (1596-1650) y otros estudiosos del cerebro situaron en esa región la sede del alma, que desde allí encauzaba los humores. En su tiempo se asociaba el cerebro a una bomba hidráulica, que regulaba el espíritu a través de la presión del líquido.

Desde la segunda mitad del siglo XVII, sin embargo, fue ganando terreno la relevancia del cerebro: pasó de las cavidades al tejido nervioso. Con ello, el tálamo (o lo que entonces se entendía por tal) también cayó del pedestal, y el término empezó a designar las paredes laterales del tercer ventrículo. El diencéfalo en su conjunto comenzó a ser considerado lo que era, la antecámara del cerebro.

Estructuras componentes

¿Qué aspecto ofrece el diencéfalo? El núcleo de las estructuras componentes corresponde al tálamo. Visto de lado, recuerda una masa en forma de gota, en cuya cabecera asoma el grueso de la misma; su porción posterior, algo más delgada, se curva hacia abajo (*véase la figura de la página 42*). La figura muestra solo el tálamo derecho, pero existe también el tálamo izquierdo. Uno en cada hemisferio cerebral. Entre ambos se halla el tercer ventrículo cerebral en forma de ranura.

A la cola doblada del tálamo se la denomina metatálamo. Rodea los pedúnculos cerebrales (en latín *crura cerebri*), una compacta gavilla de fibras nerviosas, que conecta la corteza cerebral con el resto del cerebro. El pedúnculo cerebral se expande junto al tálamo y forma allí una suerte de tabique. En un corte vertical del encéfalo se asemeja a una cápsula; hablamos de la capsula interna. En la dirección del cerebro, la cápsula se deshilacha en una corona radiante (*corona radiata*).

Hipotálamo

Descendemos al hipotálamo. Por delante y debajo de ambos tálamos se encuentran sendos embudos. El posterior va a parar a un tubo largo y estrecho, el infundíbulo (*infundibulum*). De su extremo inferior pende una glándula del tamaño de un guisante, la hipófisis o glándula pituitaria, que está dividida en un lóbulo anterior y otro posterior.

El infundíbulo anterior, algo mayor, sin tubo, se llama receso supraóptico (*recessus supraopticus*). Por su extremo inferior entran en el cerebro los nervios ópticos procedentes de los ojos e inmediatamente se cruzan en el quiasma o entrecruzamiento óptico (*chiasma opticum*). A propósito, las fibras nerviosas ópticas acaban, en su mayor parte, en el metatálamo, es decir, en la cola de la gota. Un poco detrás de los infundíbulos divisamos dos estructuras: el par de corpúsculos mamilares (*corpora mammillaria*). Todas estas estructuras constituyen, en conjunto, el hipotálamo.

Epitálamo

Al epitálamo pertenece, en cada hemisferio cerebral, una estructura del tamaño de una cabeza de alfiler, el núcleo de la brida (*nucleus habenulae*). Cada uno de los núcleos se conecta, mediante un fino cordón, con la glándula posterior; se

RESUMEN

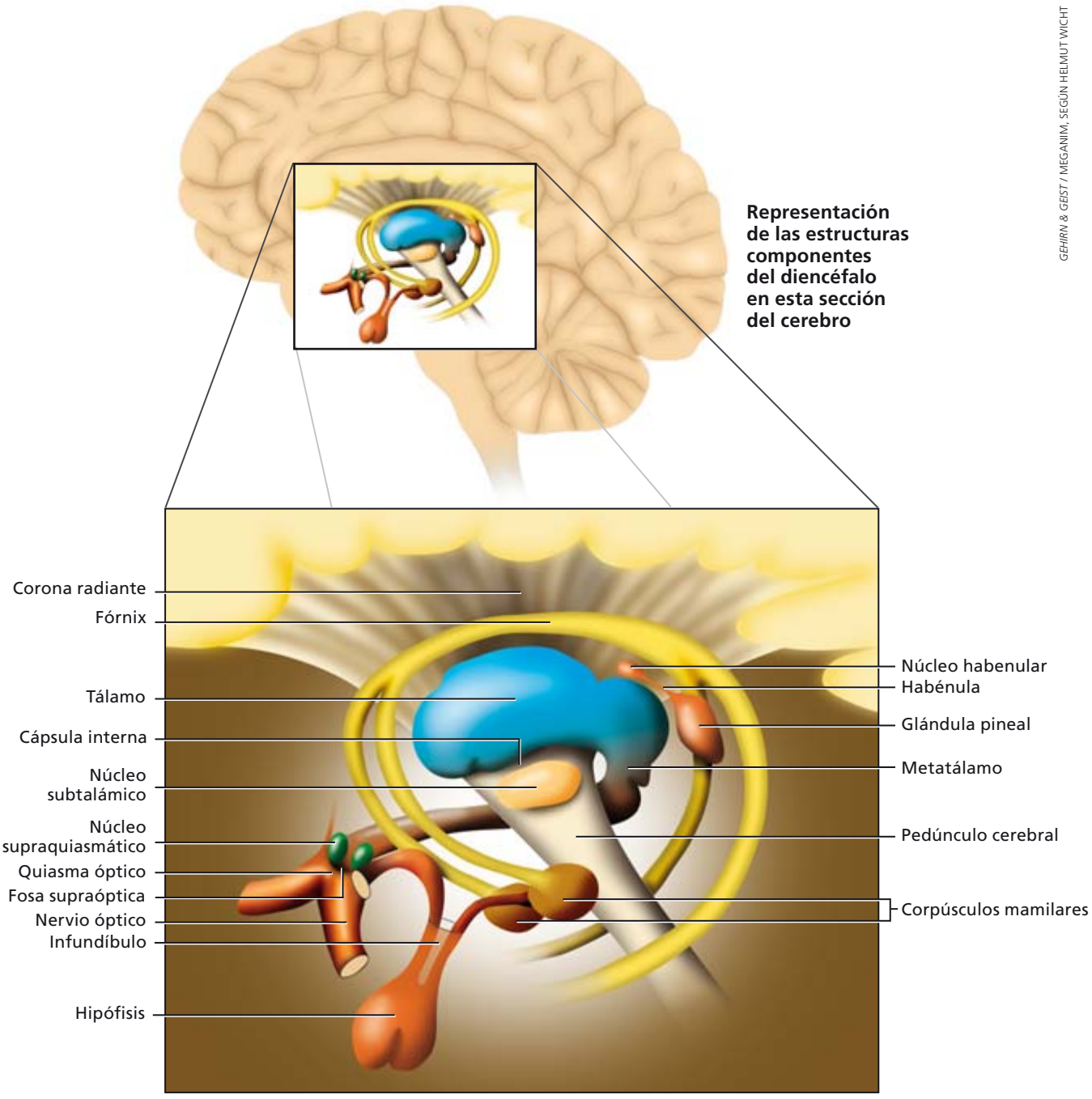
En el medio

1 La mayor parte del diencéfalo se encuentra oculta entre ambos hemisferios cerebrales. De hecho, se aloja en el centro del encéfalo.

2 Por él pasan la mayoría de las fibras en dirección a la corteza cerebral, por lo que es una estructura fundamental para la actividad cortical.

3 Los componentes del diencéfalo son el tálamo, el hipotálamo, el subtálamo y el epitálamo.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 24



GEHRN & GEST / MEGANIM, SEGÚN HELMUT WICHT

COMPONENTES DESTACADOS

Las estructuras más llamativas del diencéfalo son el tálamo y el fórnix (*en la figura, las del hemisferio derecho, vistas desde la izquierda*).

trata de la brida o rienda (en latín, *habenula*). Por su parte, la glándula en cuestión guarda un lejano parecido con un cono de pino. Nos referimos, obviamente, a la glándula pineal; si bien su denominación latina abandona su resonancia botánica: *epiphysis cerebri*.

Bóveda

Toda la región descrita se halla enmarcada bajo una bóveda o cúpula: el fórnix. Sus dos pilares curvados ascienden, desde los corpúsculos mamilares, en dinámicos arcos hacia delante, se fusionan y se allanan para formar una bóveda sobre el diencéfalo. Después se vuelve a bifurcar, por detrás, en dos arcos separados, que se dirigen a los lóbulos temporales del cerebro.

Hasta aquí nos hemos ceñido a la estructura del diencéfalo. Pero ¿cuáles son sus funciones? Los neurólogos ven el tálamo como la *puerta de la conciencia*. Se refieren, sobre todo, al metatálamo, que recibe informaciones de ojos y oídos, así como de algunas zonas laterales del tálamo, adonde llega todo lo que nosotros sa-

boreamos, tanteamos y palpamos. Aquí residen las neuronas de relé, transmisoras de las señales aferentes a las respectivas áreas cerebrales. Mas, ante un caudal constante de informaciones repetidas, tras un par de segundos, interrumpen su transmisión.

¿Lleva el lector una alianza? En caso afirmativo, probablemente hace tiempo que no le presta atención. Pero si se la quita, sentirá que ya no la lleva. Esta sensación le durará un par de segundos. Si después se vuelve a poner el anillo, reaparece por un momento una extraña sensación, que desaparece también con rapidez. Si repite la operación un par de veces, y hace girar el anillo en el dedo, mientras sopla sobre la piel, advertirá que su conciencia empieza, de repente, a interesarse por esa parte del cuerpo. Todo el proceso ha llegado al cerebro, que ha instruido al diencéfalo para que preste atención a cuanto, en adelante, se relacione con la primera falange del dedo.

¿Cuál es la versión neuronal de ese fenómeno? Las estructuras corticales excitadas por el constante toqueteo devuelven señales a las neuronas de relé, de las que reciben informaciones. El diencéfalo retransmite ahora esas banales informaciones sobre el tema «anillo en el dedo». Por fortuna, el celo se aplaca en cualquier momento; si no ocurriera así, difícilmente podríamos llevar una alianza durante mucho tiempo.

Sopa de ideas

Por esos conductos se comunican las regiones del tálamo con el cerebro, en ambos sentidos. Cada área cortical, que recibe en el tálamo informaciones de una zona determinada, devuelve, a su vez, señales para la misma zona y así condiciona nuestro foco de atención.

Gran parte del tálamo no recibe ninguna información sensorial del exterior, sino que está recíprocamente ligada en exclusiva con la corteza cerebral. Estas conexiones resultan decisivas para nuestro pensamiento. Viene a suceder algo parecido a lo siguiente: en determinadas zonas cerebrales superiores, de funciones asociativas, hierve a borbotones, sin pausa, una sopa de ideas; gorgotea y lanza burbujas, enardecida por una permanente afluencia de informaciones sensoriales y retazos de recuerdos de otras zonas corticales. Algunas veces, una de tales burbujas crece tanto sobre los nudos de acoplamiento positivos con el tálamo, que asciende rauda y se visualiza (es decir, entra en el campo de la conciencia): surge una idea, un propósito, una decisión.

Glándulas endocrinas

Una estructura elipsoide bajo el tálamo, el núcleo subtalámico (*nucleus subthalamicus*), es responsable de los movimientos. Dicho núcleo se halla ligado, en ambos sentidos, con el cerebro, en concreto con los ganglios basales.

En el hipotálamo, existen neuronas que nos permiten sentir hambre, sed y disgustos, pero también toda clase de placeres. Además, se sitúan aquí, cerca de las aperturas del embudo, neuronas especializadas que segregan hormonas; entre ellas, la oxitocina, que provoca los dolores y contracciones del parto.

Las hormonas sintetizadas son, en parte, transportadas a la hipófisis, de donde pasan a la corriente sanguínea; en parte, estimulan a la hipófisis para que libere sus hormonas propias. Comprobamos, pues, que el hipotálamo trabaja como una glándula endocrina o de secreción interna, que, junto con la hipófisis, dirige una serie de procesos corporales, entre otros, el crecimiento y el ciclo menstrual.

A propósito de ciclos, el hipotálamo le fija al organismo otros ritmos más. Los dos núcleos supraquiasmáticos, directamente encima del quiasma óptico, son considerados sede de nuestro reloj interno, cuyo tictac se deja sentir en la glándula pineal. A esta, hace más de 400 años, Descartes la erigió erróneamente en sede del alma; cual válvula hidráulica, debía dirigir el flujo de las corrientes humorales.

Hoy sabemos que la epífisis no tiene nada que ver con el alma cartesiana y muy poco con la hidráulica. Antes bien, y ateniéndose al reloj interno, produce la hormona melatonina: en escasa cuantía durante el día, abundante durante la noche. El neuromensajero se reparte por el torrente circulatorio del cuerpo y sincroniza el ritmo de 24 horas, producido por los núcleos supraquiasmáticos, con el biorritmo del cuerpo. En otras palabras: que estemos cansados o despiertos, que nos domine el malhumor por las mañanas o seamos aves nocturnas, todo esto lo regula el diencéfalo y, por eso, es responsable, en última instancia, del *jet lag* subsiguiente a un vuelo transoceánico.

¿Y qué pasa con los corpúsculos mamilares y con el fórnix? Forman parte de un circuito funcional muy distinto del cerebro: del sistema límbico, que regula nuestro mundo afectivo.

Helmut Wicht *es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

ANATOMÍA

Ganglios basales

Los ganglios basales controlan nuestro movimiento. Tarea que desempeña también la corteza motora. Los anatomistas resuelven esa aparente antinomia

HELMUT WICHT

RESUMEN

Control automático

1 Núcleo caudado, putamen, globo pálido, núcleo subtalámico y sustancia negra integran los ganglios basales. Algunos autores incluyen el claustro.

2 Los ganglios basales saben cómo efectuar una secuencia de movimientos; con qué fuerza y turnos deben tensarse los músculos.

3 Si se dañan, la coordinación deja de funcionar y aparecen síntomas típicos del trastorno motor global, como en el párkinson.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 26

Si hacemos un corte transversal del cerebro, observaremos que la superficie se halla recubierta de una fina corteza grisácea, la corteza, compuesta por los cuerpos celulares de miles de millones de neuronas, compactamente empaquetadas: las células grises. Justo debajo de la corteza, el tejido se nos ofrece con un blanco reluciente. Por aquí corren las fibras nerviosas, prolongaciones de las neuronas que establecen miríadas de conexiones desde, hacia y en el interior de la corteza.

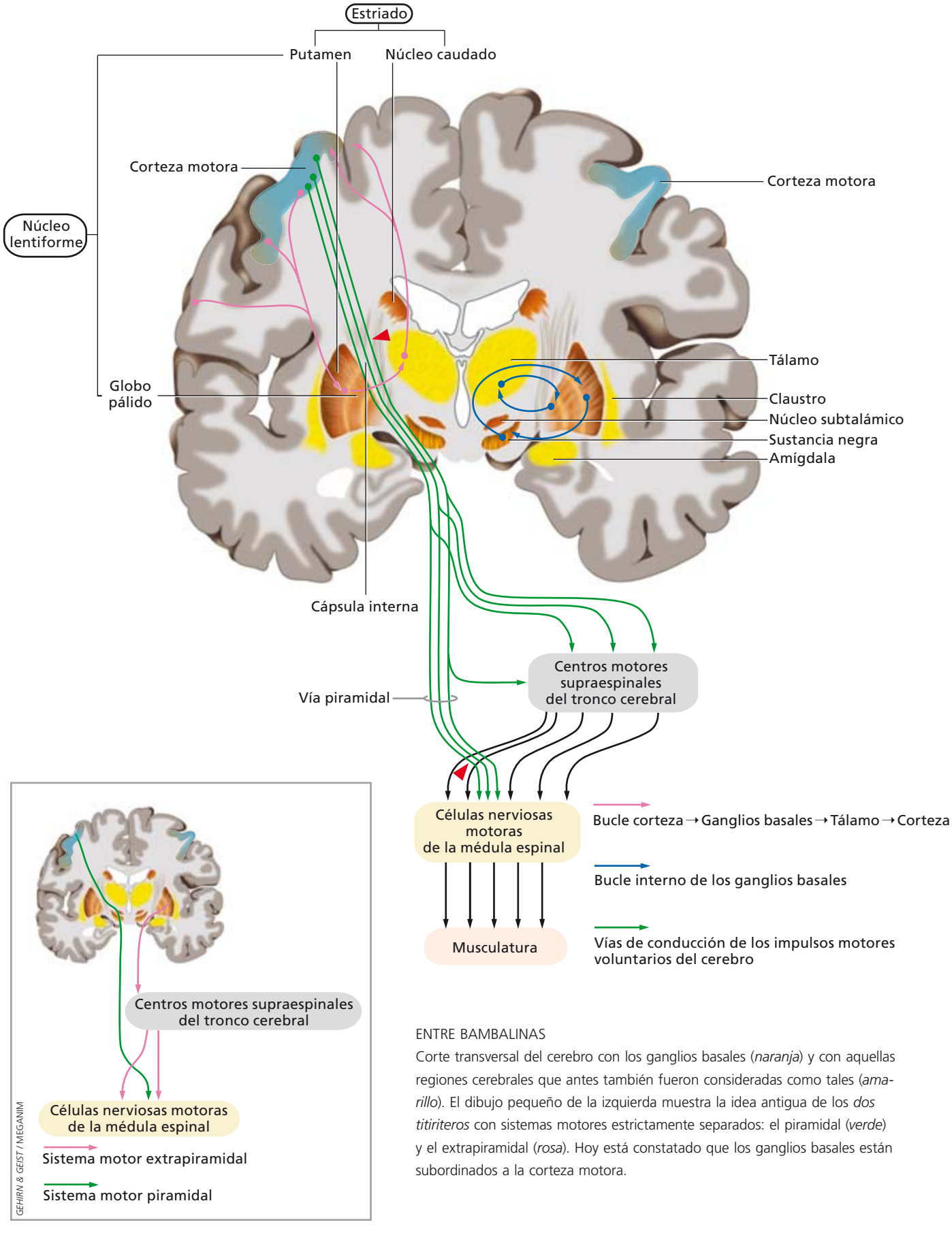
Más abajo, el cerebro se vuelve de nuevo gris. En torno a las cavidades, encontramos acumulaciones de cuerpos de células nerviosas; los pioneros de la investigación cerebral las llamaron ganglios basales, del griego *ganglion*, que significa conglomerado, nudo o tumor. Tejido nervioso gris, en todo caso, que se halla bastante profundo, cerca de la base del cerebro.

Hasta ahí llegaba el conocimiento sobre los ganglios basales hace 150 años. Más adelante se comprobó que algunos de esos conglomerados celulares descritos en el interior del encéfalo (*en amarillo en el dibujo*) desempeñaban tareas completamente distintas de los restantes —los «verdaderos»— ganglios basales (*en naranja*). Por eso, en la actualidad el tálamo se adscribe al diencéfalo, y la amígdala al sistema límbico.

¿Qué nos queda? En primer lugar, el estriado, el cuerpo con estrías: dos cuerpos de sustancia gris que fueron separados uno de otro por un haz de fibras durante el desarrollo embrionario. Este haz de fibras es la cápsula interna. De este modo, en el lado interno de dicha cápsula reside una de las partes del estriado: el núcleo caudado (el núcleo de la cola); y, en su lado externo, la otra: el putamen (el núcleo en forma de cáscara).

Junto al putamen se advierte una estructura triangular de color gris claro, interrumpida en su mitad por una fina capa de sustancia blanca. Esta estructura es el globo pálido. A veces, el globo pálido y el putamen se unen y forman el núcleo lentiforme. Lo que va junto o no, anatómicamente hablando, depende muchas veces de su aspecto.

Al lado, situado más interiormente que el globo pálido, tendríamos el núcleo subtalámico y, por debajo de este, la sustancia negra. Considerados en su conjunto —núcleo caudado, putamen, globo pálido, núcleo subtalámico y sustancia negra— integran, según la definición actual, los ganglios basales. Sin olvidar al claustro, una delgada tira de sustancia gris situada lateralmente al putamen. Aunque no se sabe si en realidad el claustro pertenece o no a los ganglios basales, por la sencilla razón de que se ignora qué función desempeña. Algunos autores piensan incluso que podría tratarse de un trozo extraviado de la corteza.



ENTRE BAMBALINAS

Corte transversal del cerebro con los ganglios basales (*naranja*) y con aquellas regiones cerebrales que antes también fueron consideradas como tales (*amarillo*). El dibujo pequeño de la izquierda muestra la idea antigua de los *dos titiriteros* con sistemas motores estrictamente separados: el piramidal (*verde*) y el extrapiramidal (*rosa*). Hoy está constatado que los ganglios basales están subordinados a la corteza motora.

¿Para qué sirven todos estos conglomerados grises localizados en la profundidad de nuestro cerebro? Es evidente que tienen algo que ver con el control de nuestros movimientos. Si un paciente presenta dañados los ganglios basales a causa de una lesión cerebral o de una enfermedad, se resiente su movilidad. Los músculos se vuelven rígidos o dormidos, aunque ocasionalmente tiemblen o tengan movimientos involuntarios. En neurología se habla de trastorno motor global. Este tipo de trastornos no es desgraciadamente infrecuente. En unos casos, un accidente cerebrovascular —es decir, una obturación o rotura de los vasos sanguíneos cerebrales— puede afectar a los ganglios basales. En otros, a causa de enfermedades degenerativas (párkinson), se mueren las células nerviosas, sobre todo las de esas áreas cerebrales, por causas que hasta ahora nos resultan desconocidas.

Además también existen trastornos motores focales, que se limitan a grupos musculares determinados. En este caso se afectan —por culpa también de un accidente cerebrovascular— las áreas de la corteza cerebral responsables del movimiento: la corteza motora.

Estas observaciones llevaron a los anatomistas a un origen doble del movimiento. Uno sería la corteza motora. Lo denominaron sistema motor piramidal, porque las fibras nerviosas que parten de la corteza motora hacia el tronco cerebral conforman una figura triangular que acaba en punta. En el tronco cerebral, las fibras nerviosas neuronales procedentes de la corteza se cruzan al lado contrario, razón por la cual cuando se produce un accidente cerebrovascular en una mitad del cerebro, las parálisis corporales aparecen en el lado contrario.

El otro punto de origen estaría formado por los ganglios basales. Sus fibras no irían directamente a la columna vertebral, sino a un centro subordinado: el centro motor supraespinal del tronco cerebral. Este concepto algo pomposo describe un conjunto de grupos neuronales que solo comparten un proceso: envían fibras nerviosas hacia la médula espinal. A esta segunda cadena de mando se la denominó sistema motor extrapiramidal. La palabra extra no significa aquí suplementario, sino externo, porque sus vías descendentes hacia la columna vertebral no circulan por dentro de la pirámide: o bien unas se cruzan por otros lugares o bien otras no se cruzan en absoluto hacia el lado contrario.

Las competencias de cada uno de los dos sistemas estaban, según ese modelo, perfectamente diferenciadas. El sistema piramidal gobernaba los movimientos voluntarios y todavía no completamente entrenados; por ejemplo, cuando uno tiene que tocar un nuevo instrumento musical. Todo movimiento, desde la posición del cuerpo, pasando por la colocación de los brazos, hasta el movimiento más pequeño de los dedos, es controlado por el sistema motor piramidal de forma consciente y a menudo muy trabajosa.

En cambio, el sistema motor extrapiramidal se encargaba de los movimientos derivados, esos movimientos automáticos que se ponen en marcha de forma rutinaria cuando uno domina un instrumento y se pone a tocar una pieza que conoce de memoria y de cuyos detalles no necesita preocuparse. Los ganglios basales gobernarían así los movimientos voluntarios, realizados de forma principalmente inconsciente; son los movimientos que suelen comprometer al cuerpo entero o, al menos, a los grandes paquetes musculares, como cuando uno corre, monta en bicicleta o habla.

Ruina del modelo dual

En realidad no se puede separar un sistema del otro. Hemos de abandonar la idea de un sistema motor piramidal frente a un sistema motor extrapiramidal. Ambos deben englobarse bajo el concepto de sistema motor voluntario.

El mito de la estricta separación de las funciones, persistente todavía en los viejos manuales, es falso. Según el estado actual del conocimiento, los ganglios basales guardan una interrelación estrecha. A modo de botón de muestra, la lesión responsable de la enfermedad de Parkinson es un trastorno de las fibras nerviosas que corren entre el estriado y la sustancia negra.

Además, apenas hay uniones directas de los ganglios basales con el centro motor supraespinal del tronco cerebral. La principal salida de los ganglios basales se produce, a través del globo pálido, hacia el tálamo en el diencéfalo; y este, a su vez, manda fibras hacia la corteza. La corteza irradia de vuelta fibras hacia los ganglios basales.

Los ganglios basales alcanzan los centros motores del tronco cerebral y de la médula espinal solo mediante un rodeo a través de la corteza motora.

Dentro de ese sistema único, cada centro se encarga de tareas especializadas. Así, los ganglios basales se ocupan de la regulación global, y la corteza cerebral de la regulación focal. Dicho con otras palabras: los ganglios basales saben

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

cómo realizar en conjunto una secuencia de movimientos, con qué turno y con qué fuerza tensar los músculos. Por su parte, la corteza motora conoce qué músculos determinados son necesarios en cada secuencia del movimiento.

Corteza y ganglios

Si se dañan los ganglios basales, la coordinación deja de funcionar y aparecen los síntomas típicos de un trastorno motor global. Por ejemplo, los temblores y vaivenes de las extremidades en la enfermedad de Parkinson, los movimientos repentinos y violentos en forma de bruscos coletazos del balismo o los extraños retorcimientos del baile de San Vito (el corea de Huntington).

Ello no obstante, la corteza puede todavía controlar algunas tareas motoras finas. Lo comprobamos cuando un paciente con párkinson enhebra un hilo o hace un juego con los dedos. A menudo desaparecen de golpe el temblor de brazos que tantas molestias les causa en otros movimientos menos finos.

Las fibras nerviosas que parten de la corteza y se dirigen hacia la médula espinal pasan por la cápsula interna, es decir, por los ganglios basales. Si estos haces nerviosos son dañados a este nivel (*punta de flecha roja superior en el esquema de la página 45*), entonces los miembros quedan colgando como si estuvieran dormidos.

Siguiendo su camino descendente, las fibras nerviosas van de la cápsula interna al tracto corticoespinal, es decir, a la vía piramidal. Este es el cable decisivo, del cual depende el movimiento voluntario. A pesar de ello, no hay que infravalorar el papel de unos nudos subordinados: los centros motores supraespinales. Si se daña ahora el tracto corticoespinal (*punta de flecha roja inferior en la ilustración*) —mientras que permanecen intactas las fibras que van desde la corteza hacia la columna vertebral pasando por los centros motores supraespinales— entonces las consecuencias son sorprendentemente escasas.

Esta lesión se ha realizado de manera experimental con monos. Solo han aparecido problemas con los dedos de las manos y de los pies. Nada más. Con esta alteración se reduce, por tanto, solo un aspecto del movimiento, la destreza de los dedos.

Helmut Wicht es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Ángel González de Pablo: *De la trepanación a la teoría de la neurona, De la cartografía del cerebro al robot, Herófilo y la anatomía cerebral, Ganglios basales, Recuerdos efímeros*; F. Asensi: *Médula espinal, Anatomía del cerebelo, Circunvoluciones cerebrales*; I. Nadal: *Nueva consideración de los nervios, Tallo cerebral, Estructuras del diencéfalo*; Ignacio Navascués: *Circuitos en el sistema límbico, El hipocampo, un enigma por resolver*; Álex Santatala: *Simulación cerebral*; Mar Sanz Prevosti: *Tras la pista de la conciencia*; Marián beltrán: *La melodía de las circunvoluciones*; Luis Bou: *El necesario escepticismo sobre los escáneres cerebrales*

Portada: © Fotolia / Vasiliy Yakobchuk

Mente y cerebro

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Yvonne Buchholz
Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero

Edita

Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Gehirn & Geist

CHEFREDAKTEUR: Carsten Könneker (verantwortlich)
ARTDIRECTOR: Karsten Kramarczik
REDACTIONSLEITER: Steve Ayan
REDAKTION: Katja Gaschler, Christiane Gelitz, Anna von Hopffgarten, Andreas Jahn (Online-Koordinator), Frank Schubert
FREIE MITARBEIT: Joachim Marschall
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg, Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann, Anke Lingg, Gabriela Rabe
REDAKTIONSASSISTENZ: Petra Mers
VERLAGSLEITER: Richard Zinken
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck

Distribución

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona - Tel. 934 143 344

Publicidad

Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Copyright © 2012 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69126 Heidelberg

Copyright © 2012 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista.

ISSN 2253-959X Dep. legal: B. 3021 – 2012

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

ANATOMÍA

Circuitos en el **sistema límbico**

Horno de emociones, diario de actividades y puerta al mundo de los olores, todo eso es el sistema límbico

HELMUT WICHT

RESUMEN

Circuitos emocionales

1 En 1878, el neurólogo Paul Broca observó un conjunto de áreas corticales diferenciado y con forma ovalada. Se originaba el concepto de sistema límbico.

2 El sistema límbico incluye estructuras relacionadas principalmente con las respuestas emocionales, pero también con los procesos de aprendizaje y memoria.

3 Entre las regiones del sistema límbico circulan poderosos fascículos de fibras.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 25

A la hora de definir el sistema límbico, cualquier reunión de neuroanatomistas se transforma en un hervidero de opiniones. La expresión se la debemos a Paul Broca (1824-1880). El término latino *limbus* significa «ribete» o «borde». Broca denominó *grand lobe limbique* —gran lóbulo marginal— al objeto de sus investigaciones, queriendo indicar, con ello, los bordes replegados hacia dentro de la corteza cerebral. Estos conforman un óvalo abierto hacia delante.

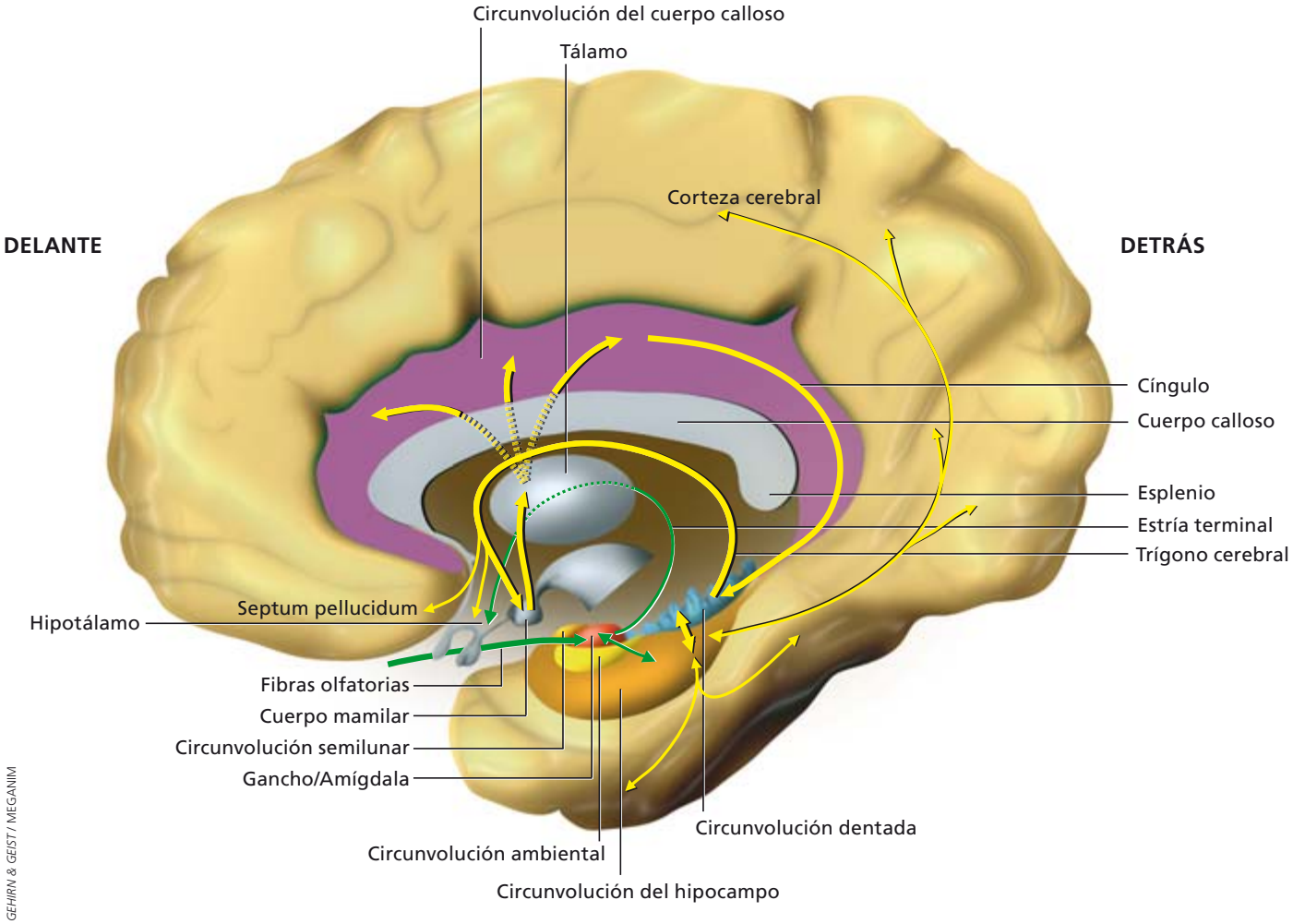
Si se rodea imaginariamente, se advierte una serie de circunvoluciones características sucesivas. Los anatomistas llaman también giros a estas circunvoluciones; el término latino singular *girus* procede de la palabra griega *gyros*, que significa círculo o curva.

Para no perderse en el siguiente paseo por la anatomía cerebral, lo mejor es orientarse por la figura adjunta. El punto de partida de nuestra ronda es el cuerpo calloso, un fascículo ancho de fibras nerviosas que une entre sí los hemisferios derecho e izquierdo. El cuerpo calloso se encuentra envuelto por la primera de las circunvoluciones cerebrales mencionadas, la circunvolución del cuerpo calloso o giro cingular (*gyrus cinguli*, en latín), que forma, a su vez, parte del sistema límbico.

Como corresponde a todo cíngulo, la circunvolución del cuerpo calloso sigue de cerca la forma gruesa del cuerpo calloso y se repliega alrededor del extremo posterior espeso, también conocido como esplenio del cuerpo calloso. La circunvolución del cuerpo calloso se adelgaza hacia delante, hasta el istmo de la circunvolución del cuerpo calloso, para volver a ensancharse y recibir otro nombre: circunvolución del hipocampo, que discurre a lo largo del hipocampo.

El hipocampo se sitúa algo por encima, en la llamativa circunvolución dentada; en la ilustración, se encuentra oculto, en gran parte, por la circunvolución del hipocampo. En una zona más anterior hallamos la circunvolución semilunar y la circunvolución ambiental (*gyrus ambiens*). Bajo una eminencia del tamaño de una judía, el gancho (*uncus*), situado delante mismo del hipocampo, se oculta el cuerpo amigdalino o amígdala. Todas estas estructuras forman en conjunto el *grand lobe limbique* de Broca.

El propio Broca creía que este lóbulo servía para la olfacción. Craso error, según demostraron más tarde los estudiosos del cerebro: solo la circunvolución semilunar, la circunvolución ambiental y partes del cuerpo amigdalino reciben informaciones más o menos directas del sistema olfatorio. Las demás regiones se ocupan de otras cosas, ¿cuáles son?



LAS SEÑALES DEL MIEDO
El circuito de Papez (*flechas amarillas*) administra los recuerdos autobiográficos y el circuito amigdalino (*flechas verdes*) modula nuestra vida emocional.

Red tupida de datos

Antes de responder necesitamos reparar en una cualidad característica del cerebro: sus elementos componentes se traban en una tupida red de conducciones nerviosas. Algunas de estas autopistas de datos son tan densas, que un anatomista experimentado podría separarlas perfectamente durante su preparación con una espátula.

Desde hace tiempo se sabe que entre las regiones del sistema límbico circulan poderosos fascículos de fibras. El más grueso de estos cables nerviosos se denomina cíngulo y une la circunvolución del cuerpo calloso con el hipocampo. Este, junto con el subículo (*subiculum*) adyacente, se comunica con los cuerpos mamilares a través del trígono cerebral. Los cuerpos mamilares emiten, a su vez, fascículos robustos a los núcleos anteriores del tálamo; desde aquí, fibras nerviosas se dirigen a la circunvolución del cuerpo calloso, a través de la corona radiada.

Se cierra así un circuito neuronal, que describió en 1937 el neuroanatomista James W. Papez (1883-1958) y que constituye el origen de las emociones. Ni que decir tiene que las células no se mueven en círculos, sino las señales con las que se comunican.

Los cuerpos mamilares y los núcleos del tálamo no se ajustan a la definición del sistema límbico de Broca, como linde de la corteza cerebral, ya que forman parte del diencéfalo. Papez tampoco acertó con sus sospechas sobre la misión de su circuito neuronal. Se ha podido comprobar entre pacientes que mostraban una interrupción del mismo como consecuencia de un traumatismo o de una enfermedad. La interrupción, por otra parte, no es tan rara, porque muchas neuronas del hipocampo son extraordinariamente sensibles y mueren en cuanto dejan de recibir oxígeno, por ejemplo, tras una breve parada cardíaca sin otras secuelas.

Esas personas no solo padecen trastornos emocionales, sino también de la memoria autobiográfica. No logran recordar hechos personales, ni memorizar números de teléfono nuevos, ni la dirección después de una mudanza, ni el lugar

donde se encuentra una cuchara que habían depositado en otro cajón. Este tipo de trastorno se conoce como amnesia anterógrada. La pérdida de la memoria inmediatamente anterior a un episodio terrible, por ejemplo, un accidente, puede obedecer a la interrupción del circuito de Papez, si bien en estos casos el trastorno resulta pasajero y reversible. Todo esto indica que el circuito de Papez no representa el centro de las emociones, sino el de la memoria a corto plazo.

Si se examinan minuciosamente las comunicaciones del sistema límbico con el resto del cerebro, como ocurría antes con las preparaciones macroscópicas, se observa que las estructuras están unidas entre sí. No hay ninguna región cerebral que no entre en contacto con los centros límbicos a través de dos o tres estaciones de relevo. En puridad, pues, todo el cerebro es más o menos límbico. Con ello, el concepto pierde todo su sentido, la delimitación del resto.

El núcleo del sistema

Recordemos una vez más que, en efecto, existe el circuito de Papez y que se ajusta aproximadamente a lo que imaginaba su autor. Más aún, es el centro del sistema límbico, sobre el que se reúnen otros grupos de células nerviosas dispuestas en capas de cebolla, comunicadas entre sí y con una forma, a menudo, anular. Imagínese una rotonda, en torno a la cual se dispusiera otra más amplia y así sucesivamente. Por supuesto, existen lugares por los que se puede entrar y salir de las rotondas. De lo contrario, todo lo que debemos o queremos recordar quedaría en el exterior.

La vía de acceso más ancha discurre por la circunvolución del hipocampo. La parte de la corteza cerebral, que se encuentra en esta circunvolución, se designa también —de forma equívoca— como corteza entorrinal, lo que literalmente quiere decir corteza situada en medio del olfato. En realidad, esta región solo controla fundamentalmente el olfato de algunos animales; en la especie humana, únicamente los segmentos anteriores se relacionan con el sistema olfatorio. El resto recibe información de todas aquellas regiones de la corteza cerebral encargadas de las funciones cognitivas. La corteza entorrinal emite, a su vez, fibras para el hipocampo. Precisamente, estas comunicaciones nerviosas son las primeras que se destruyen en la enfermedad de Alzheimer. Sus consecuencias fatales para la capacidad de pensar son bien conocidas; por desgracia, aún se ignoran las causas de la muerte celular.

Del circuito de Papez salen tres vías: la primera vuelve a discurrir por la circunvolución del hipocampo; se halla esta tan ligada al hipocampo y a la corteza cerebral, que las señales fluyen en los dos sentidos. Por ello, la información procesada por el sistema límbico puede llegar (de nuevo) a la corteza. La segunda vía pasa por el trígono cerebral. Emite también fibras nerviosas para las regiones de la parte anterior del hipotálamo que constituyen el origen de los sentimientos de alegría y desgracia. Así pues, como ocurre en la vida real, la cognición y la emoción están inextricablemente unidas. La tercera vía también pasa por el trígono del cerebro en dirección al *septum pellucidum* y a los ganglios basales. Estos últimos controlan nuestros movimientos.

Del cuerpo amigdalino nace un segundo circuito límbico. La amígdala, en realidad, se especializa en las emociones, sobre todo negativas (ira o repulsión). Pero también las novedades y los sucesos inesperados, que pueden producir miedo, excitan las neuronas del cuerpo amigdalino. A través de un arco, la estría terminal, esta estructura envía fibras nerviosas para el hipotálamo y el *septum pellucidum*, de las que, a su vez, recibe información.

Este circuito se halla también unido a otras regiones cerebrales. Así, inmediatamente delante y por debajo del cuerpo amigdalino descubrimos áreas olfatorias (incluso dentro de la propia amígdala). Quizás este acceso directo al sistema límbico explique por qué los olores mueven más las emociones que otros sentidos. De hecho, las señales olfatorias son siempre filtradas por el sistema límbico antes de que las percibamos, y esto lo sabemos con certeza: no hay nada que huela así sin más; o huele bien o huele mal. Con los demás sentidos, cuyas señales alcanzan la corteza por otras vías, no sucede igual.

Además, el cuerpo amigdalino se conecta en ambos sentidos con la corteza cerebral, envía fibras nerviosas para la circunvolución del hipocampo —es decir, el circuito de Papez— y posee contactos con los centros motores del cerebro. En breve, las lindes de la corteza cerebral, junto con algunas estructuras del diencéfalo, están unidas a través de fibras nerviosas circulares; hablamos de una red que regula las emociones, la olfacción y la memoria.

***Helmut Wicht** es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

Anatomía del cerebelo

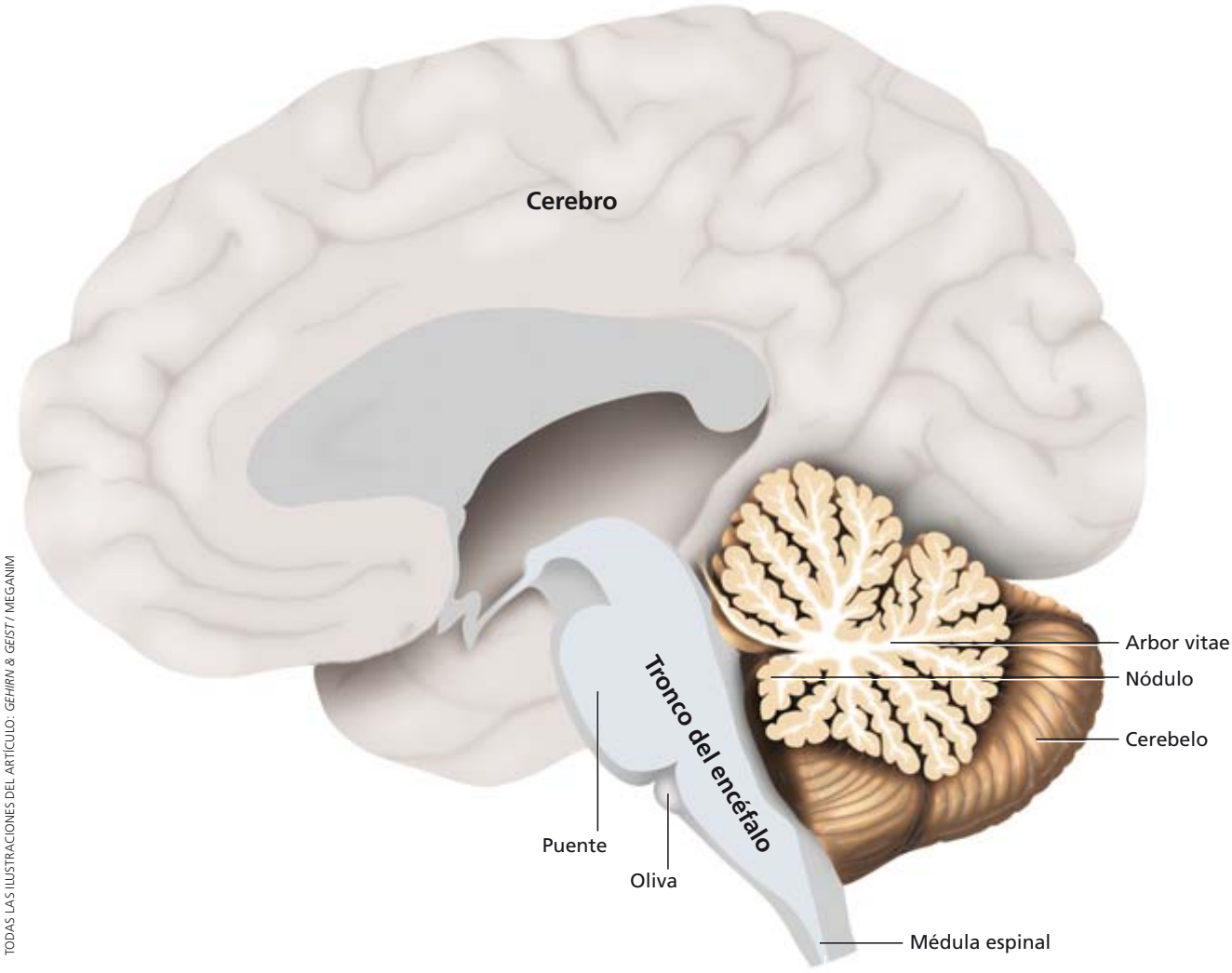
Compete al cerebelo la coordinación de los movimientos. Pero nos hallamos lejos de conocer los mecanismos subyacentes de esa y de otras funciones que cumple

HELMUT WICHT

La neuroanatomía abarca el sistema nervioso en su plenitud, desde la médula espinal hasta el lóbulo frontal de cerebro. Sus cultivadores tienen, sin embargo, particular debilidad por el cerebelo. Ese cerebro pequeño, si nos atenemos a su etimología (*cerebellum*), constituye una de las partes mejor estructuradas del encéfalo.

DISPOSICIÓN RAMIFICADA

El cerebelo (*en marrón*) está situado por detrás y por debajo del cerebro, junto al tronco del encéfalo. Llama la atención por su superficie finamente plegada. En el corte longitudinal por la línea media se puede reconocer el blanco árbol de la vida (*Arbor vitae*).



TODAS LAS ILUSTRACIONES DEL ARTÍCULO: *GEHIRN & GEIST* / MEGANIM

RESUMEN

Dispositivo fundamental

1 El cerebelo constituye el centro de coordinación de todos los movimientos del cuerpo.

2 Este «cerebro pequeño» se encuentra debajo de los hemisferios cerebrales y envuelve la cara dorsal del tronco del encéfalo.

3 Recibe múltiples aferencias sensoriales. No obstante, su función es fundamentalmente motora.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 27

Lo mismo que en el cerebro, también en el cerebelo hay dos hemisferios unidos en su parte central. La zona de contacto evoca la forma de una lombriz de tierra, de donde le viene su denominación de vermis cerebeloso (*Vermis cerebelli*). En la cara superior del cerebelo sobresale el «gusano» entre los dos hemisferios, mientras que en las caras inferior y posterior se halla profundamente hundido. Los anatomistas han dado en llamar vermis superior o montaña del cerebelo a la cara superior; a la inferior, vermis inferior o valle del cerebelo.

La superficie del cerebelo aparece plegada. Los pliegüecillos del cerebelo, finos y regulares, se conocen con el nombre de hojas, *folia* en latín. Si se hace un corte longitudinal del cerebelo se comprende el nombre porque las percibimos unidas a las ramas de un árbol. La estructura blanca y visible de la superficie del corte constituye el árbol de la vida (*Arbor vitae*).

En su interior, cerca de las raíces, hay unas manchas de sustancia gris que corresponden a apretados paquetes de somas neuronales. Se trata de los núcleos cerebelosos profundos. El mayor de ellos ofrece el aspecto de una rueda dentada; por eso hablamos de núcleo dentado (*Nucleus dentatus*).

Copos y nudos

En su exterior, la plisada superficie del cerebelo muestra un aspecto grisáceo. Los somas neuronales forman aquí, como en el cerebro, una corteza. El cerebelo dispone de su propio *cortex*.

Allí donde el cerebelo limita con el tronco del encéfalo encontramos dos copos (*flocculi*). Mediante un pequeño tallo, estos copos se unen a la cabeza del gusano en lo más profundo del valle del gusano. La cabeza del gusano recibe el nombre de nódulo (*nodulus*). Los flóculos y el nódulo actúan en estrecha cooperación, por lo que su conjunto es conocido como lóbulo nódulo flocular (*Pars nodulofloccularis cerebelli*). Hay más estructuras y más nombres. Pero, lo importante: ¿qué función cumplen?

Los estímulos procedentes de otras zonas del encéfalo llegan al cerebelo a través de las raíces del tallo del cerebelo. De esta forma, la médula espinal informa constantemente del estado en que se encuentra nuestro aparato motor: tono muscular, posición de las articulaciones o tensión de los tendones. Todo ello queda registrado. Las vías nerviosas responsables de llevar esta información van a parar al vermis y a dos bandas de apenas un dedo de anchura, situadas junto a él. La región recibe el nombre de espinocerebelo. Si por accidente o enfermedad se lesiona esta zona, resultan graves problemas en la deambulación y la bipedestación.

Vestíbulo cerebelar

Los flóculos y los nódulos, por el contrario, se encuentran en íntima relación con el VIII par craneal que, entre otras áreas, procede del órgano del equilibrio de nuestro oído interno: el vestíbulo. Sin la zona vestibulocerebelar, así se la conoce, tendríamos constantemente vértigo, no podríamos andar ni mantenernos en pie.

El resto del cerebelo, a saber, las grandes partes laterales formadas por los hemisferios, se subordinan a la corteza cerebral. Desde allí parten fibras nerviosas hasta el puente (*pons*), donde conectan con neuronas cuyas dendritas penetran en los hemisferios cerebelosos. El pontocerebelo o cerebrocerebelo, de ambos modos se le designa, rige los movimientos voluntarios delicados (verbigracia, prensión y manipulación de objetos o coordinación de los músculos laríngeos que intervienen en la locución).

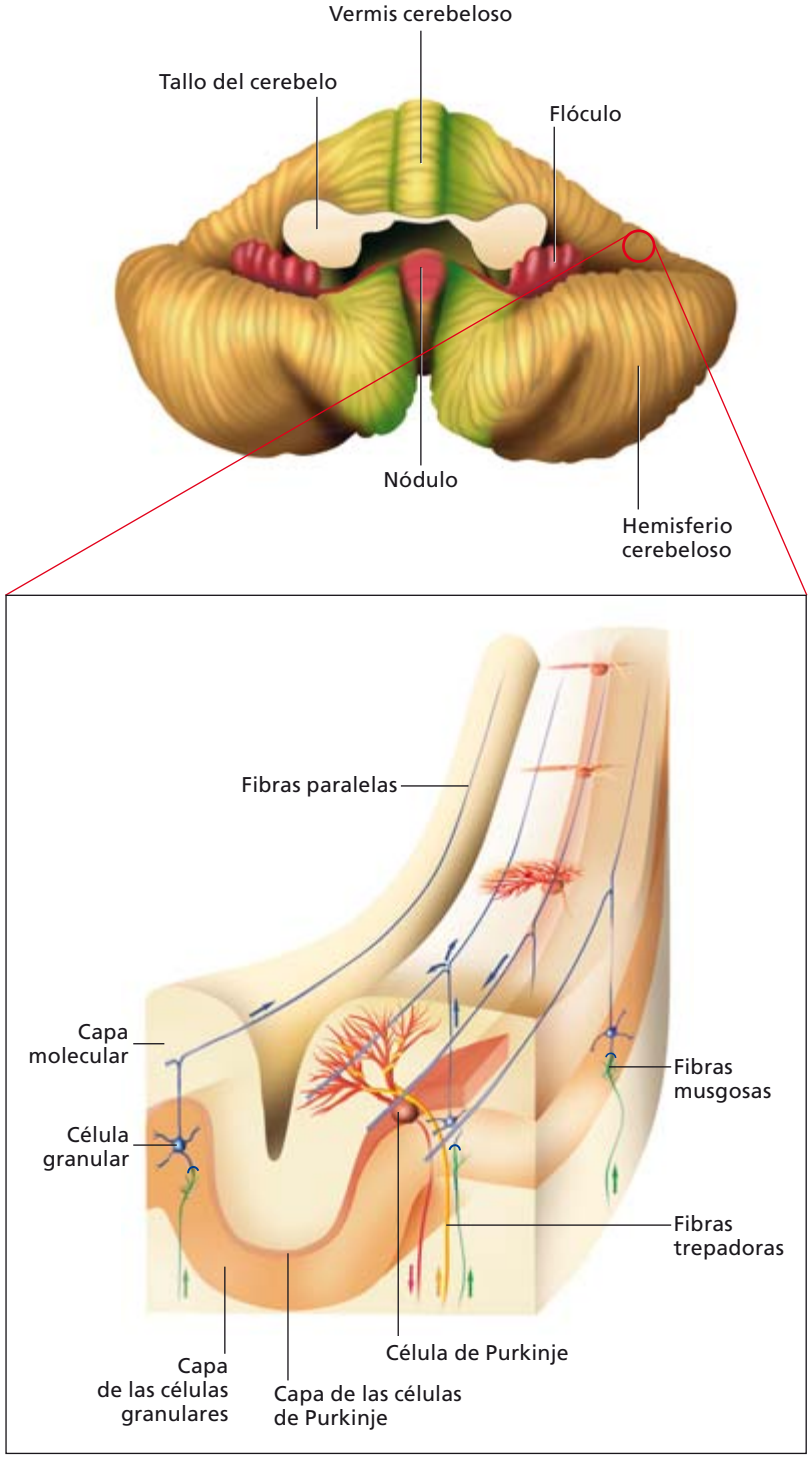
Para que las tres áreas no funcionen aisladamente, sino que lo hagan de forma coordinada existe todavía una tercera entrada de información. En este caso procede de la oliva, cuyas neuronas recogen informaciones de fuentes muy dispares: tronco del encéfalo, cerebro e incluso el propio cerebelo. La información se retransmite luego a las áreas cerebelosas antes mencionadas.

Cada una de las partes del cerebelo pueden delimitarse perfectamente. Su estructura microscópica supone un auténtico eldorado para los amantes del orden. Allí donde se dirija la mirada se ve todo perfectamente ordenado. En la capa inferior de la corteza cerebelosa se sitúan los somas de las neuronas granulares. En ellas terminan las fibras nerviosas procedentes de la médula espinal, del sistema vestibular y del puente.

Por su parte, las células granulares envían sus prolongaciones a la capa superior de la corteza y allí se dividen en forma de T. Esta bifurcación se hace siempre de forma que la rama horizontal de la T queda siempre paralela a la dirección de la laminilla. Por ese motivo, los anatomistas hablan de fibras paralelas. Otro prodigio de orden son las células de Purkinje, llamadas así en honor de Johannes Evangelista Purkinje (1787-1869); aquí, los grandes somas neuronales se sitúan en fila guardando distancias regulares entre las células granulares y la capa de fibras paralelas.

AL DETALLE

En la imagen de arriba se representa el cerebelo visto por delante. Se reconoce en blanco la superficie del corte del tallo del cerebelo. Las áreas en rojo corresponden al cerebelo vestibular donde llegan las señales procedentes del órgano del equilibrio. En color verde está el cerebelo espinal, que recibe señales procedentes de la médula espinal. El resto corresponde al cerebelo póntico (*en marrón*), que a través del puente se relaciona con el cerebro. La corteza cerebelosa (*corte ampliado en la imagen de abajo*) consta de varias capas con un tipo de células características de cada una de ellas.



Los árboles de las dendritas de las células de Purkinje, dispuestos en un plano, alcanzan la capa de las fibras paralelas. Solo se dividen perpendicularmente a las fibras paralelas con quienes establecen contacto sináptico. Hallamos también las fibras trepadoras, que proceden de la oliva. Trepan por las dendritas de las células de Purkinje y establecen sinapsis con ellas. Por último, los axones de las células de Purkinje suponen la única salida del cerebelo. En principio, descienden hasta las capas más profundas de los núcleos cerebelosos. A través del tronco del cerebelo, estos envían fibras nerviosas a los distintos centros motores supraespinales del cerebro.

Junto a todo ello descubrimos las células en estrella, las células en cesta y las células de Golgi. Conocemos con precisión su morfología, su lugar de instalación y con qué otras células establecen contacto, amén de los neurotransmisores que utilizan. Pese a lo cual, no sabemos todavía cómo funciona el cerebelo.

Nadie cuestiona lo que confirma una sencilla observación: el cerebelo coordina nuestros movimientos. Los métodos contemporáneos de formación de imágenes han demostrado que el cerebelo desarrolla muchas funciones más. Participa en procesos cognitivos, en el aprendizaje de determinados movimientos y en su representación mental. Sin embargo, la forma en que lleva a cabo estas funciones continúa envuelta en el misterio.

La ignorancia de los neurólogos en este campo pone de manifiesto su fracaso. Mediante un análisis cada vez más detallado de cada neurona, de su estructura, conexiones, sinapsis, actividades y neurotransmisores, esperaban descubrir los mecanismos de operación del cerebelo. No lo han logrado. Está claro que el enigma del funcionamiento del cerebelo no puede resolverse mediante un método reduccionista. La solución podría venir de la actividad conjuntada de todos los componentes.

Helmut Wicht *es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

ANATOMÍA

Circunvoluciones cerebrales

La corteza cerebral ocupa la mitad aproximada del volumen del cerebro. En ella tienen su sede nuestras funciones superiores, incluida la capacidad de leer y entender lo que a continuación exponemos

HELMUT WICHT

RESUMEN

Estructura compleja

1 Para caber dentro del cráneo, la corteza cerebral se arruga en pliegues o circunvoluciones. Entre ellas aparecen los surcos. Surcos y pliegues delimitan a su vez los lóbulos cerebrales.

2 La isocorteza, o neocorteza, es la zona más evolucionada de la corteza cerebral. En ella abundan neuronas y células de la glía formando columnas corticales.

3 La corteza trabaja de forma analógica, no digital. A través de las células piramidales transmite la información procesada a otras áreas no corticales.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 28

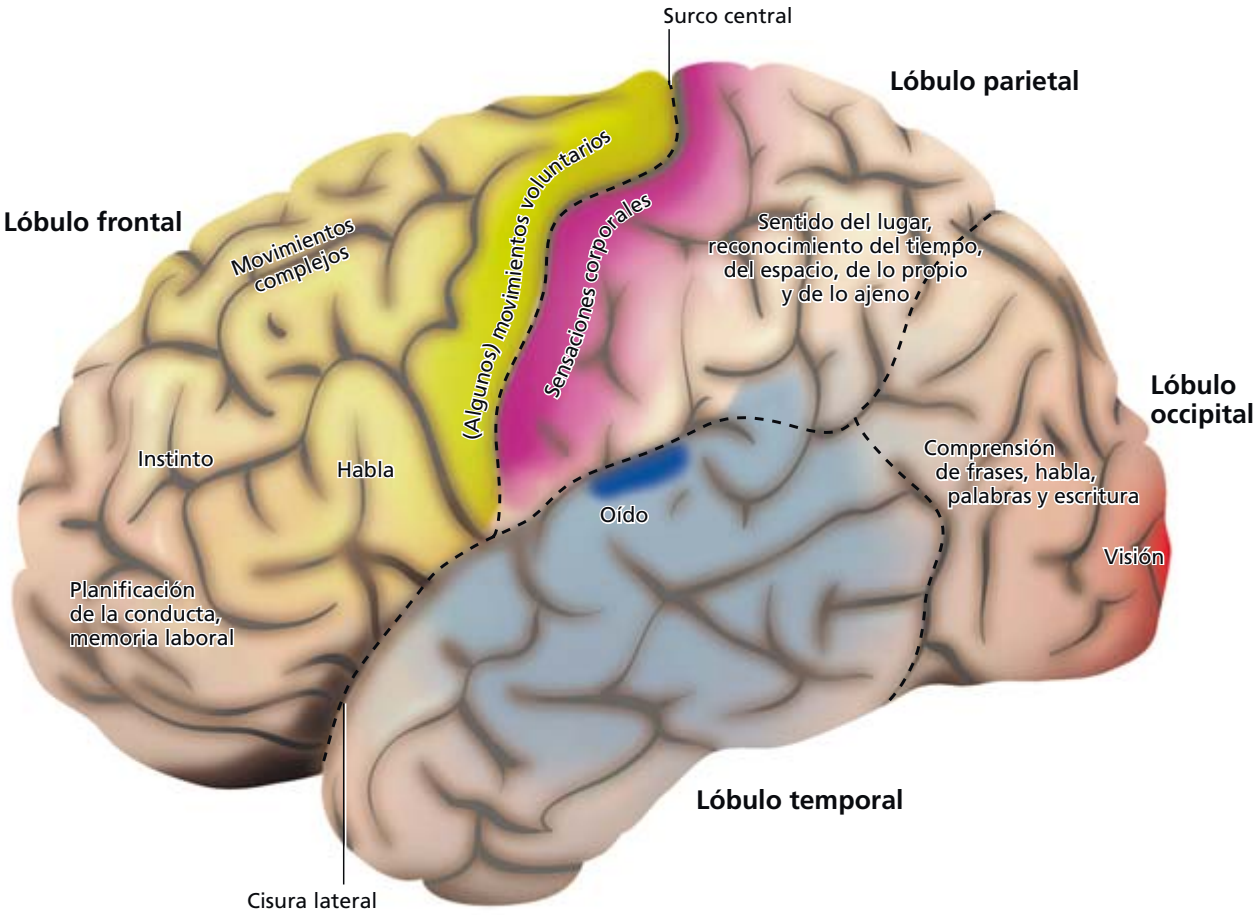
Sobre la corteza cerebral, en latín *cortex cerebri* o simplemente *cortex*, se han escrito bibliotecas enteras. A la postre, todos esos libros son expresión de la propia corteza. En nuestra producción mental se reflejan las actividades cerebrales como sustrato de la conciencia. Surge así el gran dilema: nuestra conciencia intenta entenderse a sí misma estudiando el órgano que la produce.

Resulta inmediato percatarse de la dificultad de la tarea, si no de su imposibilidad. Difícil o imposible, siempre ha fascinado a mentes inquietas. Pero cuando un anatomista se acerca a un órgano no se preocupa de sus posibles funciones, ni siquiera de formular hipótesis. Se limita a observar, describir y desmenuzar. A los fisiólogos, epistemólogos y filósofos les gusta, en cambio, reelaborarlo todo para conjuntarlo después.

La corteza cubre el cerebro con un manto gris de neuronas. Pese a su grosor de apenas medio centímetro, es mucho mayor de lo que parece. Representa aproximadamente la mitad de todo nuestro encéfalo.

Plegándose para ahorrar espacio

La superficie de la corteza, demasiado grande, no cabría en el cráneo. Debe encogerse. ¿Cómo? Arrugada en pliegues prietos que siguen un mismo patrón en todas las personas. Cada pliegue forma una circunvolución (*gyrus* en latín); los surcos entre circunvoluciones constituyen las cisuras o simplemente surcos (*sulci* en latín). Cada circunvolución y cada surco tienen su



TODAS LAS ILUSTRACIONES DE ESTE ARTÍCULO: *GEHIRN & GEIST* / MEGANIM

UN CEREBRO Y CUATRO LÓBULOS

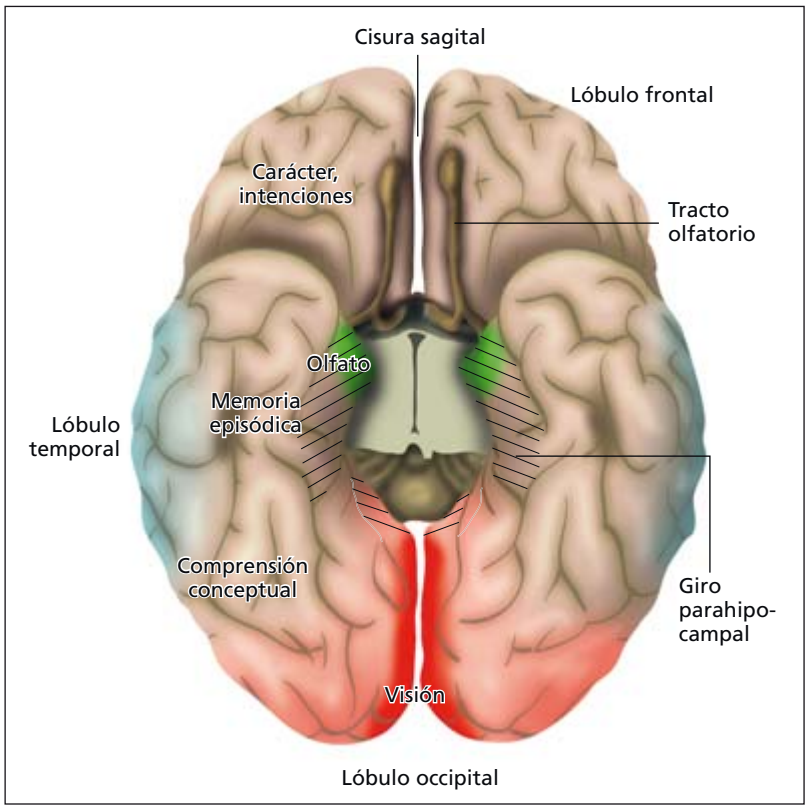
En esta vista lateral, las áreas sensoriales y motoras de la isocorteza se resaltan en colores: los tonos más fuertes marcan los campos corticales primarios; los más pálidos, los secundarios y terciarios. Las regiones en gris conciernen a la corteza asociativa. Algunas funciones cognitivas concretas tienen asiento en lugares muy determinados del cerebro.

nombre. Hay, por ejemplo, una circunvolución recta (*gyrus rectus*), unas circunvoluciones insulares, un surco rinal y muchos otros.

Nos ceñiremos a las principales circunvoluciones y surcos. Empecemos por una visión lateral. El surco central (*fissura centralis*) atraviesa íntegro el hemisferio cerebral. Las estructuras situadas por delante pertenecen al lóbulo frontal (*lobus frontalis*); las situadas por detrás, al lóbulo parietal (*lobus parietalis*), y las del extremo posterior, al lóbulo occipital (*lobus occipitalis*). La parte inferior de la corteza que parece emerger hacia delante desde los lóbulos parietal y occipital y está limitada hacia arriba por una profunda cisura (*fissura lateralis*) constituye el lóbulo temporal (*lobus temporalis*).

Si operamos, en cambio, un corte longitudinal por la línea media, observaremos el cuerpo calloso. El cerebro está formado por dos hemisferios, separados por un profundo surco o cisura sagital (*fissura sagitalis*). Para mantener unido el cerebro, hay en la profundidad de ese surco un poderoso haz de fibras nerviosas que conecta el hemisferio derecho con el izquierdo y crea el cuerpo calloso, envuelto por la circunvolución cingular (*gyrus cinguli*).

Observemos el cerebro desde abajo (*figura superior de la página 56*). Distinguimos a lo largo de la base del lóbulo frontal un pequeño haz de fibras que parten de una estructura del tamaño de un grano de arroz. Después de bifurcarse, desaparece por debajo del lóbulo temporal en la profundidad de la cisura sagital. Hablamos del



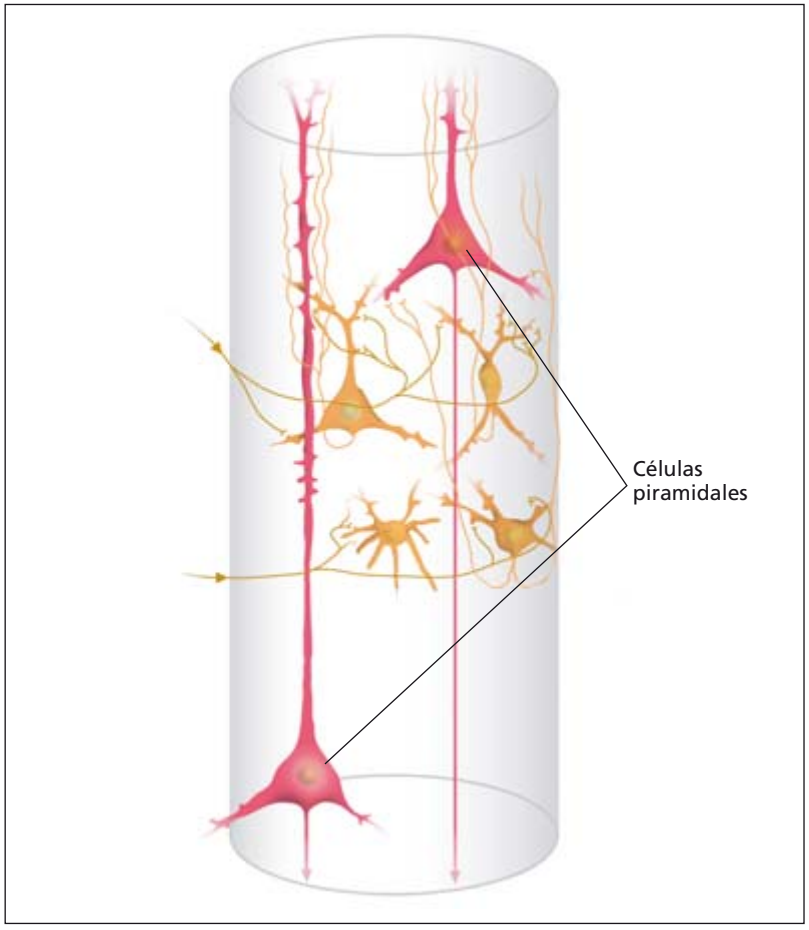
VISTA DESDE ABAJO
También aquí están marcadas en colores las áreas sensoriales de la corteza cerebral. La zona rayada señala la alocorteza.

tracto olfatorio, que transmite directamente la información captada por el olfato a la corteza cerebral. El borde medial del lóbulo temporal está formado por dos circunvoluciones: el giro parahipocampal (*gyrus parahippocampalis*) y el giro dentado (*gyrus dentatus*), vinculados además con el sistema límbico.

Las áreas corticales que rigen las funciones sensoriales y motoras integran la corteza primaria; así, en el lóbulo occipital se aloja la corteza primaria de la visión. Alrededor de tales áreas se encuentran los campos corticales secundarios y terciarios, que están también al servicio de las funciones respectivas, aunque se ocupan preferentemente de aspectos parciales específicos. En el caso de la visión, por ejemplo, son responsables del reconocimiento de movimientos, colores u objetos.

Hay, por último, áreas corticales a las que las vías nerviosas llevan información procedente del conjunto de sistemas sensoriales y motores. En esta corteza asociativa se compara el contenido interior del sistema humano (sus pensamientos e intenciones) con las informaciones procedentes del entorno y las experiencias anteriores. En definitiva, aquí se conforma el mundo tal y como lo vivimos.

En la corteza asociativa pueden alojarse determinadas funciones cognitivas o, si se quiere, determinados aspectos parciales del mundo. Algunos neurólogos creen incluso que pueden singularizarse determinadas neuronas responsables de funciones cognitivas especializadas. Aunque eso parece exagerado.



El misterio de la totalidad

Resulta admirable que percibamos el mundo como un todo unitario y no como un mosaico. La neurología cerebral nos enseña lo contrario:

LAS COLUMNAS DE LA SABIDURÍA
En el interior de la isocorteza se encuentran unas estructuras columnares situadas perpendicularmente a la superficie de la corteza conocidas como columnas corticales. En su interior, las neuronas (*en rojo y en naranja*) están conectadas entre sí. A través de las células piramidales (*en rojo*) se transmiten al exterior las informaciones procesadas en las columnas.

que no supone problema alguno desmenuzar esa *totalidad* en sus partes componentes. Algunas funciones cognitivas pueden quedar alteradas selectivamente cuando se lesiona un área cortical concreta. Así acontece con los tumores cerebrales. De repente, cierta mañana se despierta el paciente en su cama del hospital con la sensación de que su pierna izquierda constituye un apéndice extraño que un cirujano malvado le hubiese cosido al cuerpo. El paciente quiere recuperar su propia pierna. Por lo demás, el resto del sistema cognitivo funciona con normalidad, salvo la pierna de marras. Fenómenos de este tipo sirven de base para que tanto los filósofos como los fisiólogos se entreguen a la libre especulación: ¿dónde está localizada en la corteza la instancia conocida como «yo»? ¿Ocupa realmente un lugar? ¿Podemos modificarla?

Cabe igualmente preguntarse por qué es posible que diversas áreas cerebrales cumplan funciones diferentes si la corteza se presenta homogénea por doquier. Visto al microscopio, sin embargo, aparecen importantes diferencias estructurales entre las distintas áreas.

En efecto, pueden individualizarse hasta 47 áreas corticales estructuralmente diferenciadas coincidiendo con las localizaciones funcionales delimitadas por surcos. De tales 47 áreas corticales, la mayoría (unas 40) corresponden a la isocorteza o neocorteza, que supone, pues, la mayor parte de la corteza cerebral. Todo lo que se aprecia en la vista lateral del cerebro (*figura de la página 55*) es isocorteza. Debe su denominación a su uniformidad estructural (del griego *isos*, «igual»). La isocorteza consta de cinco capas de neuronas además de una fina capa de sustancia blanca en la parte más exterior. Sutiles diferencias en el grosor de las capas y en el número de neuronas de determinado tipo permiten diferenciarlo en 40 subregiones.

¿Qué aspecto tiene la estructura celular de la isocorteza? Abundan neuronas y células de la glía formando *columnas* de unos 0,25 mm de grosor que atraviesan las capas (columnas corticales). En el interior de estas columnas las neuronas están mucho más apretadas que en los espacios situados entre ellas. Los anatomistas creen que las columnas corticales suponen los auténticos módulos. Serían los procesadores de la corteza cerebral.

La corteza trabaja de forma analógica, no digital. Las propiedades transmisoras de los circuitos en el interior de las columnas pueden cambiar en pocos minutos según las características de la corriente eléctrica que circula por ellos. Puede incluso modificarse la propia disposición de los circuitos, en horas o días: las sinapsis pueden desaparecer y establecerse nuevos contactos en otros sitios. Todo ello hace que podamos aprender y olvidar las cosas.

Al observar el gráfico donde representamos una de dichas columnas corticales, no nos hemos de asombrar de la complejidad de su funcionamiento. Entran en juego muchos tipos de células y numerosas conexiones. Si pensamos que en la corteza cerebral existen millones de estas columnas, que además están constantemente cambiando su estructura, comprenderemos que los investigadores no tengan todavía ideas exactas de los pormenores de su operación.

Pirámides y columnas

Pero importa conocer cierto tipo de neuronas de la isocorteza: las células piramidales. Se llaman así porque su soma tiene forma de pirámide. Las células piramidales actúan como elementos de salida de las columnas, ya que, a través de sus axones, transmiten a otras áreas no corticales del cerebro y a la médula espinal el resultado de todos los procesos que tienen lugar en la corteza. Estas conexiones se llaman vías de proyección. Con todo, las fibras de proyección y las células piramidales a las que pertenecen suponen solo una mínima parte del *cableado* de la corteza cerebral. Un cableado que se centra en comunicaciones en el interior de la propia corteza. La mayoría de las células piramidales envía sus axones a otras áreas corticales; constituyen vías de asociación dentro del propio hemisferio cerebral o establecen comunicaciones con el hemisferio opuesto a través del cuerpo calloso formando las vías comisurales.

De ese modo, la corteza *elabora* las informaciones que ella misma produce. En eso se basan algunos filósofos para declarar que lo que nos proporciona el cerebro —nuestra imagen del mundo— no supone un reflejo de la realidad exterior, sino un producto de nuestro encéfalo.

Las áreas corticales que no forman parte de la isocorteza presentan también una estructura harto compleja. En su mayoría forman parte de la llamada alocorteza y pertenecen al sistema límbico. Una de ellas procesa el sentido del olfato. Por fin, la corteza cerebral está lateralizada: el hemisferio izquierdo puede hablar y el derecho no, entre otras diferencias.

Helmut Wicht *es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

TASCHENATLAS DER ANATOMIE, TOMO 3: NERVENSYSTEM UND SINESORGANE. (9.ª edición). W. Kahle y M. Frotscher. Thieme, Stuttgart, 2005.

ANATOMÍA

El hipocampo, un enigma por resolver

Pese a que el hipocampo del cerebro debe su nombre al caballito de mar, poco se asemeja a dicho ser marino. Con todo, hoy en día la región cerebral homónima constituye una de las estructuras del encéfalo más investigadas

HELMUT WICHT

RESUMEN

Caballito con memoria

1 El anatomista Julio César Arancio (1530-1589) reconoció en la base de los ventrículos cerebrales siluetas de todo tipo, entre ellas, un hipocampo o caballito de mar.

2 La extirpación de los dos hipocampos y los giros parahipocámpicos en el paciente H. M. permitió grandes avances en el conocimiento de la memoria.

3 Hoy sabemos que existen diferentes memorias, entre ellas, la declarativa, la procedimental y la de trabajo.

ANDREAS SUMERAUER (WWW.SOUNDBYTES.DE)

INSTRUMENTO CEREBRAL
El salterio (del griego *psallein,* «tocar la cítara») es un arpa arcaica. En el siglo XVI, el anatomista Julio César Arancio reconoció esta figura en el fórnix cerebral.

TAMÁS SEBESTENY, CORTESÍA DE HELMUT WICHT (*cerebro*); NOAA / MOHAMMED AL MOMANY (*caballito de mar*)

APODO CURIOSO

A la derecha se ve un caballito de mar o hipocampo procedente del mar Rojo (la flecha señala su aleta dorsal). El corte cerebral de la izquierda muestra un cerebro humano visto desde arriba: la parte frontal se corresponde con el borde superior de la imagen. Casi toda la corteza y el cuerpo calloso se han extirpado para exponer las cavidades internas del encéfalo: los ventrículos laterales. En la base de ambos (*1a-c*) se encuentra el hipocampo, el cual se prolonga hacia la parte media a través del fórnix abovedado (*2a*, *b*). La barra roja marca el plano de corte de la figura de la página 62.

Dos imágenes, dos hipocampos: a la derecha, un pez teleósteo; a la izquierda, marcada con cifras y letras, una región cerebral. ¿Qué les relaciona? Probablemente su forma. Fíjese bien, ¿reconoce la silueta del caballito de mar en el corte coronal de un encéfalo humano? Yo, sinceramente, no.

En cambio, Julio César Arancio fue de otro parecer. El catedrático de anatomía de Bolonia, quien viviera entre 1530 y 1589, preparó posiblemente un cerebro a semejanza del que aparece sobre estas líneas; tal fue la imagen que contempló, pues. Corría el año 1579. Arancio prefirió dejar constancia del área encefálica que observaba de su puño y letra en la obra *Observationes anatomicae* a elaborar una didáctica ilustración sirviéndose de un grabador de cobre. Sus palabras fueron:

«En la base de los ventrículos, en concreto sobre las porciones mediales, se erige [...] una sustancia nítidamente blanca que se levanta a modo de pedestal desde la superficie inferior, y que se prolonga con un cuerpo en forma de arpa o de caparazón de tortuga, para terminar

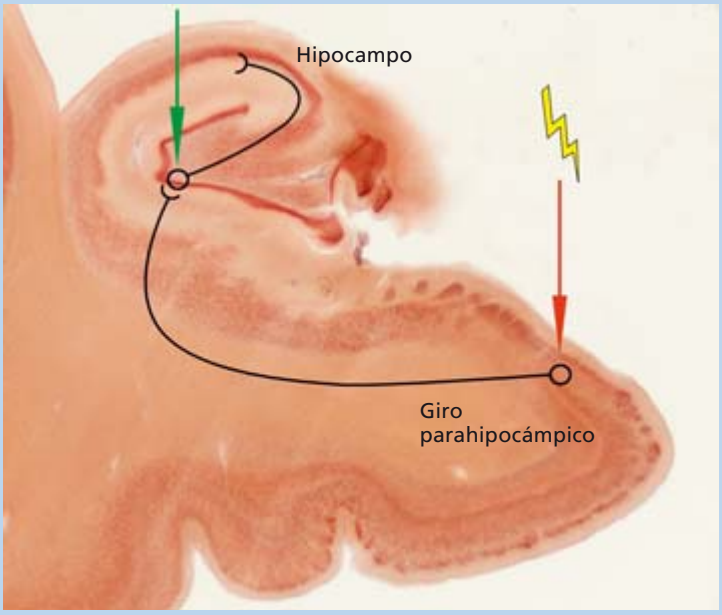
El hallazgo de la potenciación a largo plazo

La función electrofisiológica del hipocampo se descubrió hace más de 30 años en un experimento con conejos. El fisiólogo noruego Terje Lømo y su colaborador británico Tim Bliss trabajaban con el giro parahipocámpico, es decir, con la circunvolución cerebral anexa al hipocampo. Por una parte, dicha circunvolución se relaciona con áreas del lóbulo frontal responsables de la memoria de trabajo; por otra, envía un *paquete* de muchísimas fibras nerviosas (el tracto perforante, situado en el centro de la formación hipocámpica) a la fascia dentada. El giro parahipocámpico representa así en el hipocampo el lugar de conexión entre la vivencia consciente del momento y el recuerdo.

Cuando los investigadores estimularon con electrodos finos dicha región cerebral, las células del hipocampo respondieron en un inicio según lo previsto. Las neuronas conectadas reaccionaron con una señal breve al estímulo. Expresado de forma onomatopéyica: a cada *clic* siguió un *clac* (*gráfica*). Luego, los científicos aplicaron durante un par de segundos una secuencia rapidísima de estímulos sobre el tracto perforante, como si dijéramos un *clicclicclicliclic*, de manera que las neuronas conectadas casi no tuvieran tiempo de responder.

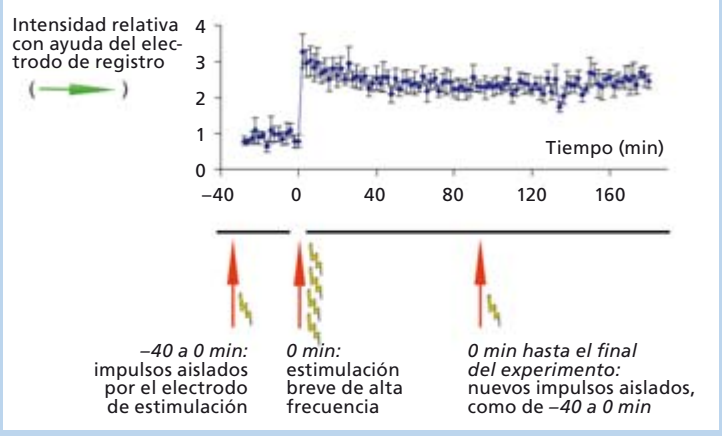
Después de esa estimulación de alta frecuencia, se continuó con estímulos aislados. Sin embargo, esta vez las neuronas del hipocampo ofrecieron una respuesta más intensa que antes: a cada *clic* seguía un *clacclacclac*. Al parecer, el estímulo de alta frecuencia reforzaba la eficiencia en la transmisión sináptica. Ese efecto (potenciación a largo plazo) duraba entre unos minutos y unas horas. De esta manera, Lømo y Bliss descubrieron los fundamentos biológicos de la memoria a corto plazo.

(«Long-Lasting Potentiation of Synaptic Transmission in the Dentate Area of the Anaesthetized Rabbit Following Stimulation of the Perforant Path», por T. V Bliss. y T. Lømo en Journal of Physiology, *vol. 232, n.º 2, págs. 331-356, 1973.)*



COMUNICACIÓN SÓLIDA

El corte microscópico ilustra el hipocampo y el giro parahipocámpico de un cerebro humano. Sobre él se dibuja el experimento animal con el que Terje Lømo y Tim Bliss demostraron en 1973 la potenciación a largo plazo. El electrodo de estimulación (*flecha roja*) excita a neuronas, cuyos axones abandonan el hipocampo en forma de tracto perforante. Con ayuda de electrodos de derivación (*flecha verde*) pueden registrarse las respuestas de las células nerviosas de la fascia dentada del hipocampo, conectadas a través de la sinapsis.



EXCITABILIDAD RÁPIDA

Los puntos azules del diagrama (*con las barras de error estadístico*) señalan la intensidad con la que las neuronas de la fascia dentada responden al estímulo eléctrico del giro parahipocámpico (*flecha roja*). La respuesta se triplica cuando se procede a una estimulación de alta frecuencia. El efecto se mantiene durante horas (potenciación a largo plazo).

CORTESÍA DE HELMUT WICHT

© ISTOCKPHOTO / ALFREDO WANG

de forma irregular [...] en sentido frontal; en conjunto, esta figura arqueada recuerda a un hipocampo, o caballito de mar, o mejor aún, a un gusano de seda [...]».

Asombra la cantidad de siluetas que Arancio creyó reconocer en la estructura cerebral: un pedestal, un arpa, un caparazón de tortuga, un caballito de mar que más bien parecía un gusano de seda... Los anatomistas actuales continúan refiriéndose a caballitos de mar, arpas y bóvedas. Acerquémonos a esta ambigua formación.

Los caballitos de mar no tienen pies

El «pedestal» de Arancio (*1a*) se denomina hoy hipocampo. La forma irregular (*1b*), donde termina toda la estructura en sentido frontal, posee un nombre relativamente absurdo concebido por el anatomista holandés Ysbrand van Diemerbroek (1609-1674): pie del hipocampo. Los caballitos de mar no tienen pies, y por no tener, ni siquiera presentan aletas pectorales o abdominales, como sí ocurre con otros peces.

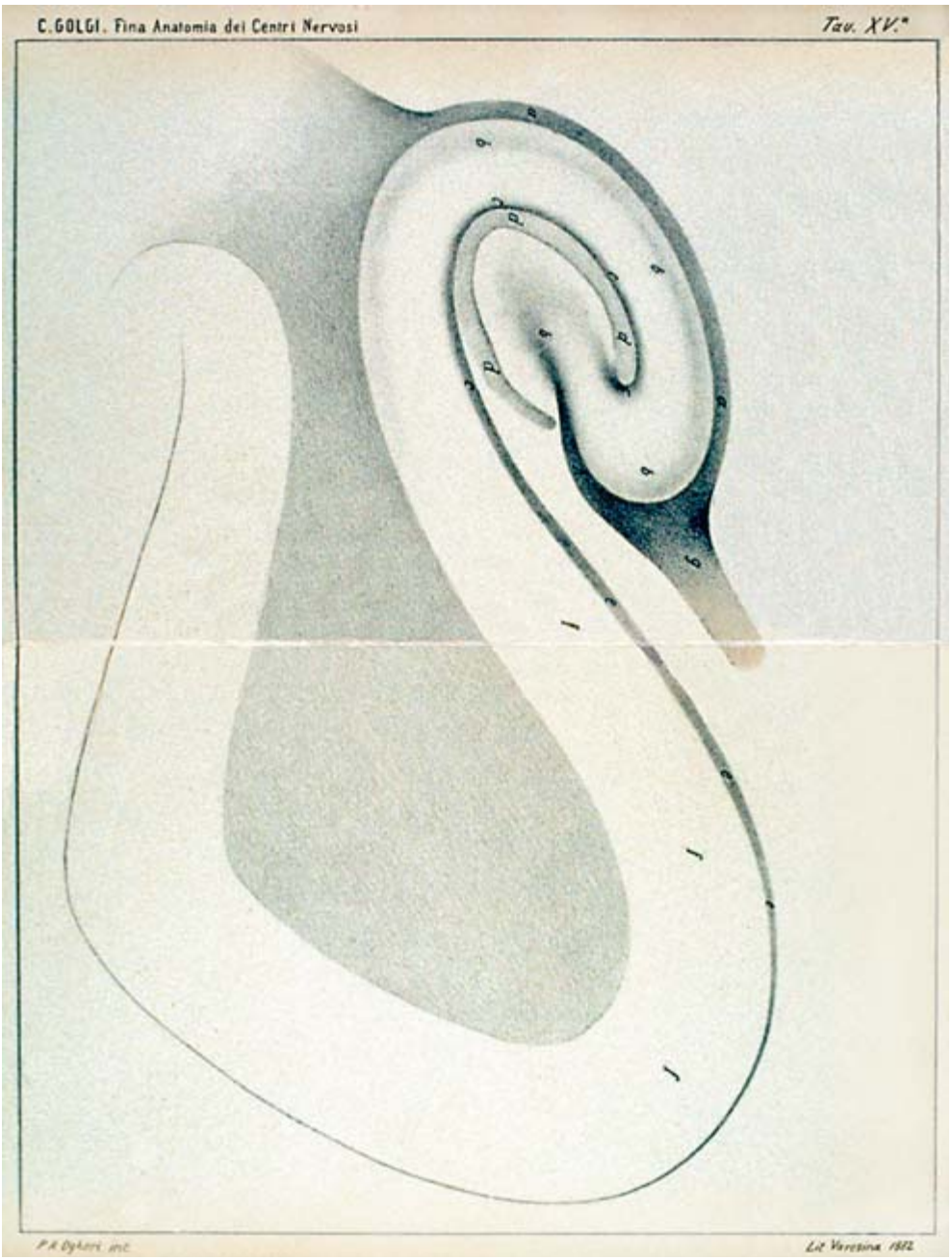
El intrincado asunto no termina allí. Los pequeños engrosamientos situados en los extremos del pie del hipocampo (*1c*) reciben el nombre de dedos del pie hipocámpico. Si, tras emplear un gran esfuerzo imaginativo, el lector logra reconocer en el cerebro un caballito de mar con su tronco y cola retorcida correspondientes, ¡Diemerbroek le colocó los dedos del pie en la cabeza!

La región se adelgaza en la zona posterior y se incurva trazando un elegante arco (*2a-b*), al que los anatomistas denominan fórnix («bóveda»). Aquí se oculta el «cuerpo abovedado con forma de caparazón de tortuga» que indicaba Arancio. En este caso, el catedrático italiano no iba muy desencaminado, ya que si sumamos el fórnix del otro lado, la figura en su conjunto parece una bóveda acanalada, o un caparazón de tortuga visto por dentro. De hecho, Arancio utilizó el término latino *testudo,* tortuga, que también significa bóveda acanalada.

La estructura triangular (*2b*), que comunica los dos brazos del fórnix (*2a*) antes de reunirse en el vértice, se conoce hasta la fecha como salterio. Bajo ese nombre se sabía un tipo antiguo de arpa, en la que las cuerdas se tensaban de forma horizontal sobre el triángulo. La plataforma del salterio del fórnix se compone, en realidad, de fibras nerviosas que discurren de forma transversal y comunican entre sí el hipocampo derecho con el izquierdo. Sin embargo, tal característica resulta difícil de reconocer incluso con los métodos modernos de preparación. El

SER MITOLÓGICO

En la Fontana di Trevi de Roma puede contemplarse cómo un tritón doma a un caballo marino. Las patas anteriores de la figura híbrida, entre caballo y pez, podrían guardar cierta semejanza con las estructuras del hipocampo cerebral. Sin embargo, no deja de sorprender que el complejo hipocampo-fórnix del encéfalo posea unos dedos del pie dirigidos hacia el exterior, al contrario que los *pies* del caballito de mar (*1c en la pàgina 59*).



DE: «SULLA FINA ANATOMIA DEGLI ORGANI CENTRALI DI SISTEMA NERVOSO. V. SULLA FINA ANATOMIA DI GRANDE PIEDE D'HIPPOCAMPO». CAMILLO GOLGI. MILAN, ULRICO HOEPLI, 1886 / CORTESÍA DE HELMUT WICHT

¿CABALLO O CISNE? El neuroanatomista italiano Camillo Golgi (1843-1926) realizó un dibujo de un corte transversal del hipocampo humano a partir del aumento de una lupa. El plano de corte se corresponde más o menos con la señal roja en la figura de la página 59. Golgi orientó el dibujo de una forma sorprendente. La parte media del cerebro se dirige hacia abajo, posiblemente por el formato de impresión. Las letras del dibujo, escritas por él mismo, muestran una inclinación de 90 grados. Si se le da la vuelta a la ilustración, la estructura podría recordar a un caballito de mar.

célebre anatomista italiano debía de gozar de un portentoso instrumental de trabajo... y aún mejores ojos.

¿Dónde se esconde, pues, el caballito de mar? Bolonia no es una ciudad costera; tampoco parece probable que Arancio hubiera visto algún hipocampo antes. Su colaborador Diemerbroek (el padre del pie del hipocampo) vivía en Utrecht; allí tampoco resultan habituales los peces marinos. En 1880, el anatomista austriaco Josef Hyrtl (1810-1894) trató de salvar el honor de sus predecesores en su monografía *Onomatología anatómica*: no se referían al caballito de mar, sino a una figura mitológica mitad caballo, mitad pez. (En las fuentes de Neptuno de la Fontana di Trevi de Roma se puede observar una.) No obstante, ese caballo marino tampoco recuerda precisamente al de la estructura cerebral de marras.

La pintura negra de Golgi

Dirijámonos ahora a la localidad de Abbiategrasso en busca de nuevas pistas. En esa pequeña aldea cercana a Milán mezcló en su momento Camillo Golgi (1844-1926) todo tipo de reactivos fotográficos con tejidos cerebrales, lo que le llevó a descubrir la *reazione nera,* el primer método de tinción para visualizar las neuronas bajo el microscopio. Tal descubrimiento mereció a Golgi en 1906, junto con su principal

«enemigo», Santiago Ramón y Cajal (1852-1924), el premio Nobel de Fisiología o Medicina. Da la casualidad que Golgi también reconoció el pez dentro de la cabeza. Dejó constancia de ello, aunque de forma subrepticia, en una ilustración microscópica.

La imagen corresponde a un corte transversal por el lugar marcado con una franja roja en el corte cerebral de la página 59. La fimbria (*g*) es el hocico, la fascia dentata (*d*) y el asta de Ammón (*c*) forman la cabeza; el subículo (*f*) el cuello, y la circunferencia o giro parahipocámpico (*f inferior*), el abdomen del caballito de mar. Falta, sin embargo, la típica cola retorcida, de forma que la figura recuerda más bien a un cisne. Pero dejemos las especulaciones a un lado.

Formulemos mejor la pregunta decisiva: ¿de qué se ocupa el hipocampo? La función de un órgano se descubre a menudo cuando se pierde. Algunas veces los médicos se ven obligados a extirpar en el quirófano el hipocampo de uno y otro lado a sus pacientes para curar los ataques epilépticos que se originan en tales estructuras. Henry Molaison, fallecido en 2008 y conocido entre los investigadores de la memoria por sus iniciales H. M., se convirtió en un caso famoso. En 1953, cuando contaba 27 años, los cirujanos le extirparon ambos hipocampos y los giros parahipocámpicos. La operación fue un éxito, ya que la epilepsia desapareció, empero con ella el paciente perdió parte de su capacidad de atención.

H. M. conservaba casi la totalidad de los conocimientos adquiridos antes de la operación, aunque luego ya no pudo aprender nada más. Sufría una amnesia anterógrada: todo aquello que se le ofrecía después de la operación le resultaba nuevo. Quizás esa fuera la razón por la que aceptaba con paciencia de santo todo tipo de pruebas a las que fue sometido durante décadas por los investigadores.

El caso H. M. ha contribuido de manera considerable al conocimiento de la memoria humana. Hoy sabemos que existe un compartimento declarativo y otro procedimental. La memoria declarativa se refleja en la escritura, el habla, los símbolos y los signos; puede activarse de manera consciente. En ella se registran los acontecimientos autobiográficos («El año pasado visité Roma») y los conocimientos generales («Roma es la capital de Italia»). La memoria procedimental, por su parte, almacena capacidades motoras (ir en bicicleta, entre otras), la cuales casi nunca reconocemos como hechos aprendidos.

Ya que el paciente no podía memorizar ningún contenido declarativo nuevo, resultaba más que probable que el hipocampo guardara alguna relación con ello. El individuo, no obstante, destacaba cada vez más en las tareas procedimentales (juegos de destreza). Lo más curioso era que no parecía percatarse de dicha capacidad. A cada nueva partida sostenía que jugaba por primera vez.

La memoria declarativa muestra una rígida organización temporal: la memoria de trabajo almacena el contenido de la conciencia durante unos segundos, es decir, el presente [*véase* «Recuerdos efímeros», por Christian Wolf; *en este mismo número*]. Así, una persona presta atención a un número de teléfono que está a punto de marcar; después, en un espacio breve de tiempo, olvida la combinación de cifras, a no ser que tenga especial interés en recordarla. Es probable que la memoria de trabajo resida en las áreas de asociación del lóbulo frontal, es decir, en la corteza prefrontal dorsolateral. Tal tipo de remembranza puede manifestarse a modo de bucles de episodios neuronales que desaparecen enseguida. La memoria de trabajo de H. M. se encontraba básicamente intacta; de hecho, le encantaba resolver crucigramas.

Una persona acaba memorizando aquellos números de teléfono que más a menudo marca. Ciertos episodios, en especial los llamativos, perviven asimismo durante tiempo en el recuerdo. La memoria de larga duración se asienta fundamentalmente en el lóbulo temporal de la corteza. Además, exige la presencia de comunicaciones sólidas entre las neuronas, las cuales se activan al reclamar el material aprendido.

Entre la memoria de trabajo y la memoria de larga duración existe otra instancia, la memoria de corta duración. Esta se remite a los últimos minutos u horas del pasado, y se sirve de almacenamiento intermedio antes de depositar los contenidos en la memoria de larga duración. La de corta duración, como se desprendía de las lagunas de H. M., reside asimismo en el hipocampo, el «caballito cerebral».

¿Quizá deberíamos hablar de «cisne cerebral»? Mejor no. Aparte de gusanos de seda, arpas y tortugas, por nuestra cabeza corretean astas de carnero (asta de Ammón), almohadillas de descanso (subículo) y ligamentos dentarios (*fascia dentata*). Suficiente, ¿no cree?

Helmut Wicht *es biólogo y profesor del departamento Senckenberg de anatomía de la Universidad de Goethe en Fráncfort del Meno.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

THE HIPPOCAMPUS BOOK. Dirigido por P. Andersen, R. Morris, D. Amaral, T. Bliss y J. O'Keefe. Oxford University Press, 2007.

HACIA UN MODELO UNIFICADO DE LA MEMORIA. F. Eustache y B. Desgrandes, en *Mente y Cerebro* n.º 43, págs. 48-56, 2010.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€

Para efectuar su pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00€

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00€

Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos

España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA

España: 7,00€ Otros países: 60,00€

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura

FUNCIONES

Simulación cerebral

Un equipo de investigación suizo está construyendo un cerebro artificial dentro de un supercomputador. Se trata del Blue Brain. Con él se proponen descifrar el funcionamiento del encéfalo

FELIX SCHÜRMANN

TODAS LAS IMÁGENES: BLUE BRAIN PROJECT / EPFL

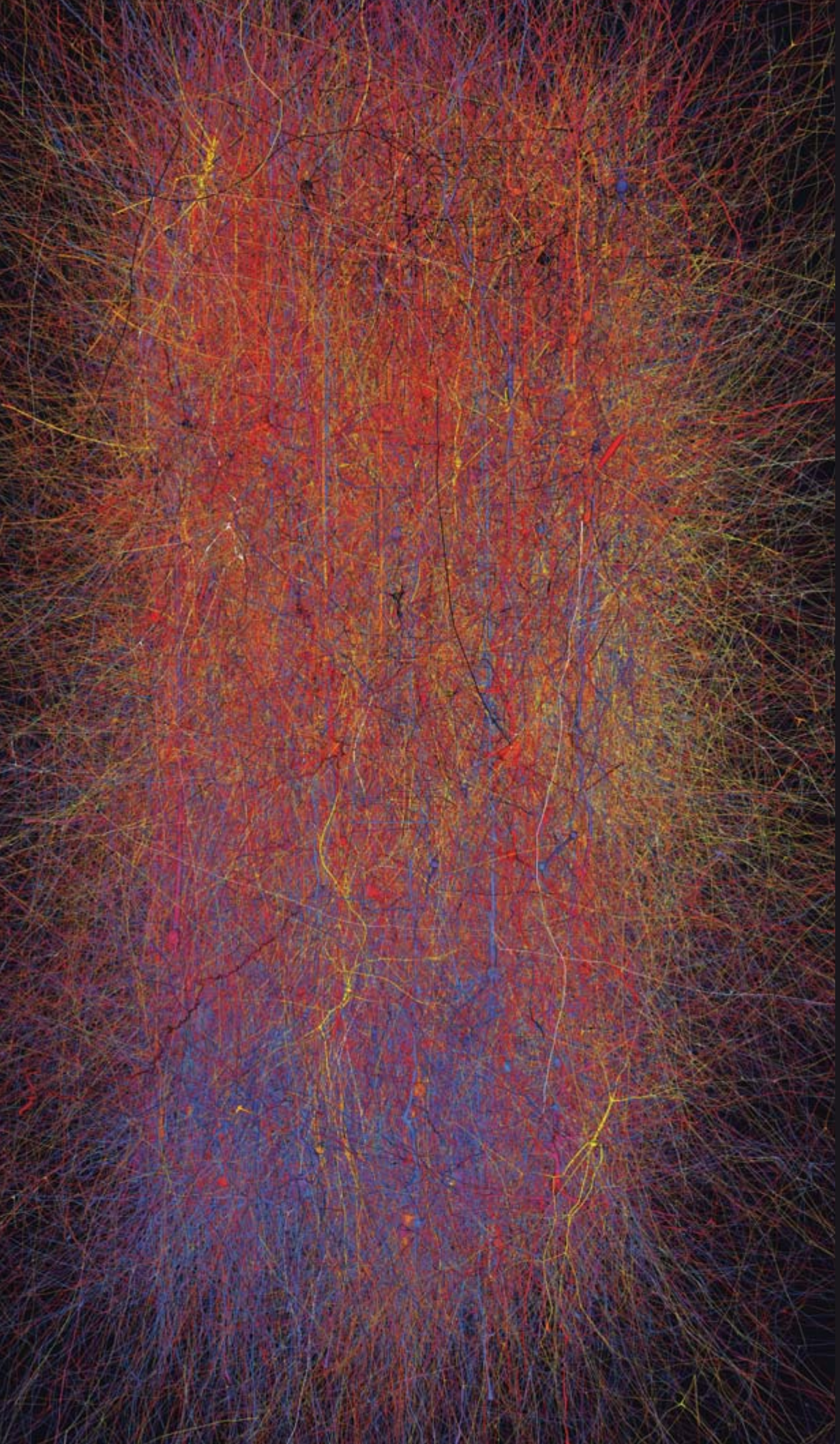
UN ENREDO DE VIDA INTERIOR
Si se realiza una ampliación de la visualización del tejido nervioso simulado se pueden reconocer los somas de las neuronas, de donde arrancan las prolongaciones celulares (axones y dendritas).

¿Cómo aprehender el modo de funcionamiento del cerebro humano? Henry Markram está convencido de que puede lograrlo a través de la simulación. Desde hace 15 años, nuestro biólogo viene investigando los componentes elementales, las neuronas. En el Instituto Max Planck de Investigaciones Médicas en Heidelberg abordó, en 1990, junto con Bert Sakmann, premio Nobel, la comunicación sináptica entre neuronas, *in vivo*.

Markram sostenía entonces que la secuencia temporal de los impulsos de activación de ambas células resulta clave dentro del proceso. Bastaba el retraso de un potencial de acción en pocos milisegundos para interrumpir la comunicación eléctrica dentro de las redes neuronales biológicas.

En 2002 Markram fundó el Instituto Brain Mind adscrito a la Escuela Politécnica Federal de Lausana, destinado a la investigación de la estructura, función y plasticidad de la corteza cerebral. Inicialmente se centró en la corteza somatosensorial de la rata, región donde se reciben y someten a un primer procesamiento las señales relacionadas con el tacto y otras informaciones provenientes de la superficie corporal.

Como el resto de la corteza cerebral, esa área está formada por un tejido nervioso de seis capas. Es tan denso, que un milímetro cúbico de



CENTELLEO DE COLORES
Modelo de una columna cortical completa, con unas 10.000 neuronas. A fin de facilitar la visualización del conjunto solo se muestra aquí simultáneamente una de cada diez células; en total, 1000. Los colores corresponden a las excitaciones eléctricas calculadas en el modelo informático en un determinado instante. Semejante información detallada sobre la vida interior de la corteza cerebral no puede ponerse de manifiesto en experimentos de laboratorio al uso.

SUPERORDENADOR
En el dispositivo negro de paredes oblicuas trabajan más de 8000 microchips, destinados cada uno a simular el comportamiento de una neurona. En conjunto constituyen un modelo informático de una columna cortical: un milímetro cúbico de tejido neuronal procedente de la corteza cerebral de una rata.

LABORATORIO
DE ALTA TECNOLOGÍA
Hasta doce neuronas con sus respectivas conexiones pueden ser investigadas en paralelo gracias a la técnica de pinzamiento de membrana (*en la imagen se investigan siete neuronas en paralelo*). Ello aporta la recopilación de datos necesaria para alimentar el superordenador Blue Brain.

dicho tejido, equivalente a la cabeza de un alfiler, alberga los núcleos de aproximadamente 10.000 neuronas. Sus prolongaciones se unen en millones de conexiones, las sinapsis, que les sirven para intercambiar información. Unidades funcionales de ese tamaño en la corteza cerebral —equiparables a los microprocesadores en un ordenador— se denominan columnas corticales.

Markram y sus colaboradores comenzaron a analizar minuciosamente los procesos eléctricos y moleculares que se daban entre neuronas, dentro de una de dichas columnas. Se apoyaron en la técnica de pinzamiento de membrana (*patch clamp*), que permite registrar simultáneamente los impulsos eléctricos de hasta doce neuronas. Los datos captados constituyen la base del proyecto Blue Brain, con el que en 2005 empezamos a convertir en realidad la idea descrita al principio: construir un modelo informático de una columna cortical lo más real posible y capaz de simular los procesos biológicos reales hasta el nivel celular.

Cada una de las 10.000 neuronas de una columna presenta su propia peculiaridad; las prolongaciones y ramificaciones desde el soma determinan su forma individual; millones de canales de iones a lo largo de la membrana celular definen su comportamiento eléctrico. A todo ello debe añadirse un sinfín de conexiones sinápticas entre neuronas que, dinámicamente, se van fortaleciendo, debilitando, desapareciendo o constituyéndose en nuevas conexiones, siempre en función del estímulo recibido por la neurona. Todos esos detalles deben tomarse en consideración a fin de establecer un modelo fidedigno de la naturaleza.

Medición de canales automatizada

Por ese motivo una parte de nuestro equipo continúa con el análisis de los procesos celulares dentro de la columna cortical mediante la técnica de pinzamiento de membrana, aportando permanentemente nuevas informaciones que realimentan el modelo. En paralelo, se aplica un sistema automático para investigar las propiedades de los aproximadamente 200 canales de iones presentes en las neuronas.

La recopilación de semejante flujo de datos es procesada por un superordenador BlueGene/L de IBM con una capacidad de 22,4 teraflops, es decir, 22,4 billones de operaciones con coma flo-

RESUMEN

Cerebro en el ordenador

1 El proyecto Blue Brain se basa en la simulación molecular del cerebro a través de un superordenador.

2 Ha nacido con el objetivo de mejorar el conocimiento sobre la estructura cerebral, así como de descubrir nuevos tratamientos neurológicos.

3 Además de analizar los procesos eléctricos y moleculares entre neuronas, se investigan las propiedades de 200 canales de iones neuronales.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 37

Investigación basada en la simulación

Cada modelo de vehículo que abandona la cadena de montaje tiene un equivalente virtual, previamente desarrollado en el ordenador. Los ingenieros pudieron así investigar, durante la fase de proyecto, un sinfín de aspectos: optimización de materiales y procesos, acústica y realización de pruebas de choque virtuales. Todo eso es posible gracias a una simulación fiel de la realidad de los fenómenos físicos, realizada por un ordenador de alta capacidad. Es importante conocer tanto la forma de cada una de las partes interesadas como las propiedades de los materiales; por ejemplo, la adherencia.

Son numerosas las disciplinas de ingeniería y ciencias de la naturaleza donde la experimentación mediante simulación se ha erigido en tercera columna central, junto con la teoría y la experimentación. En la práctica, la aplicación de métodos basados en la simulación lleva a productos más optimizados y reducción de los tiempos de desarrollo.

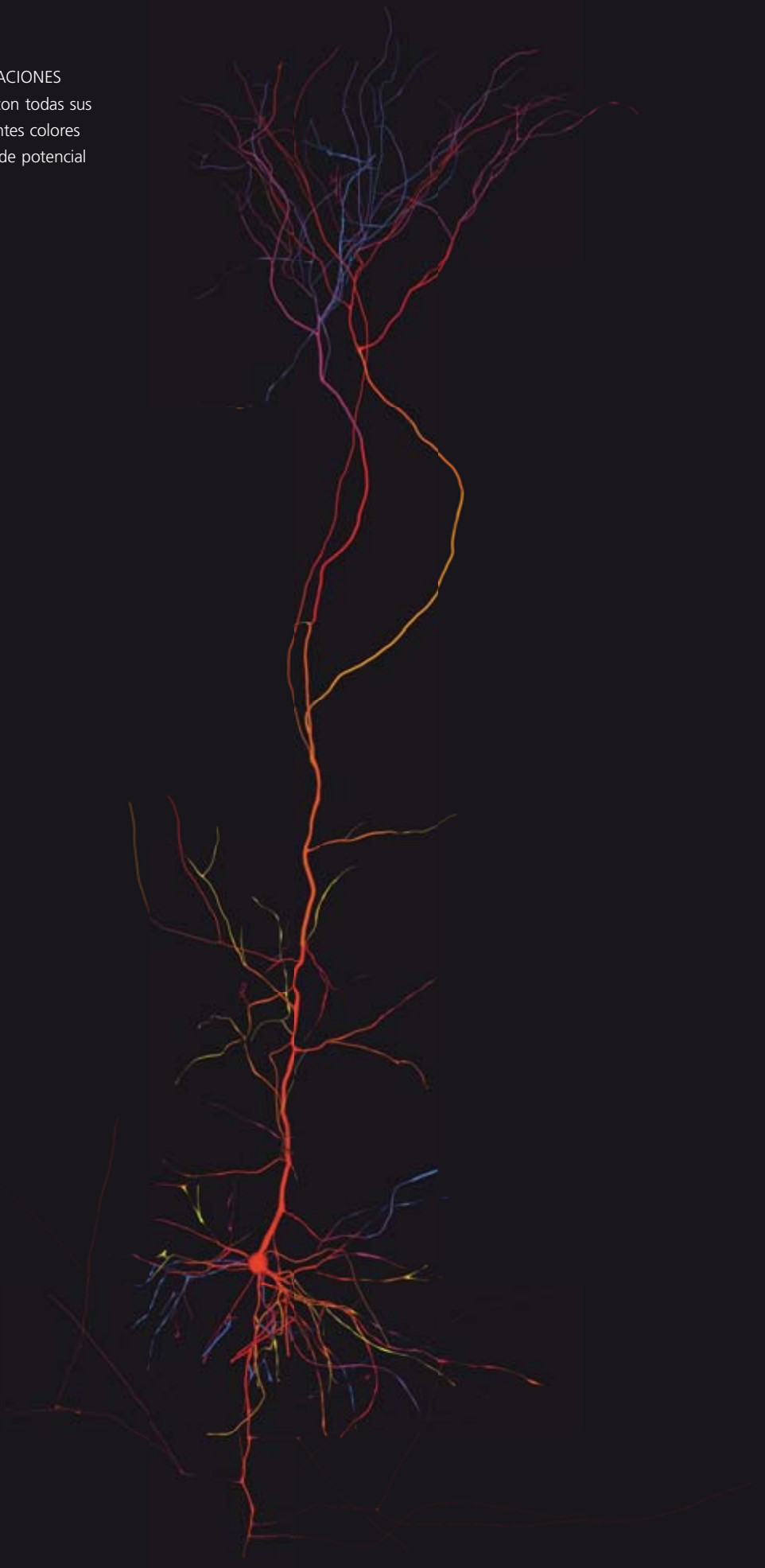
En el caso de los sistemas biológicos, los investigadores se hallan ante un reto más formidable aún al tratarse de entidades más complejas y sutiles en sus detalles. Además, los componentes de tales sistemas no han sido creados por el hombre ni diseñados por un ordenador. De ahí que no resulte tan sencillo crear una simulación y alimentarla de datos sin más.

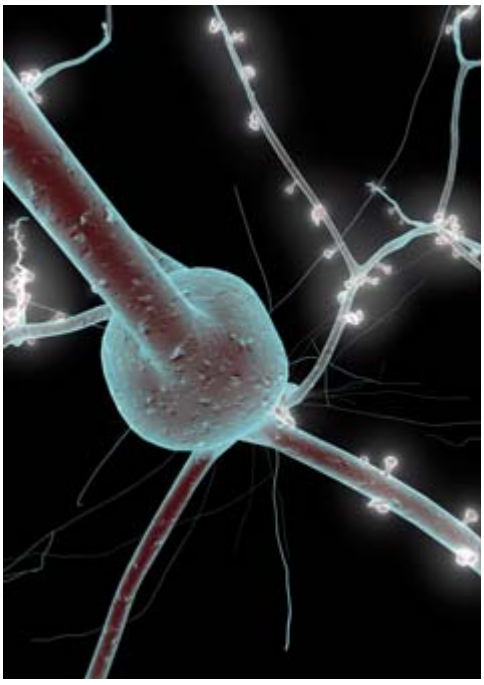
El proyecto Blue Brain de Lausana se propone aplicar métodos basados en la simulación en la neurobiología. Para ello se planteó, en primer lugar, la cuestión sobre si nuestro conocimiento de la corteza cerebral y sus componentes es suficiente para poder crear un calco válido en forma de modelo informático, es decir, que la descripción matemática de las propiedades biofísicas que abarcan desde la estructura hasta la funcionalidad fuese correcta.

Otro problema adicional: ¿se puede evitar que la diversidad y variabilidad observadas en los experimentos biológicos reales se vean mermadas por las simplificaciones del modelo? Al fin y al cabo, con la simulación se trata de generar datos en la calidad y cantidad suficientes como para permitir a los biólogos llevar a cabo las mismas investigaciones, sea en experimentos sea en el ordenador. Por ejemplo, se puede visualizar la concentración de un tipo determinado de iones en un fragmento de tejido mediante simulación, en vez de medirla mediante fluorescencia con el microscopio.

Con la coronación de la primera fase del proyecto Blue Brain a finales de 2007, se pudo responder a ambas cuestiones afirmativamente. De ello se concluye que la investigación basada en la simulación es posible también en el ámbito de la neurociencia.

MULTITUD DE RAMIFICACIONES
Una neurona piramidal con todas sus proyecciones. Los diferentes colores codifican las diferencias de potencial en la membrana celular.





ESPINAS BRILLANTES
La visualización de una neurona en el ordenador revela abundantes aspectos; por ejemplo, las espinas dendríticas: pequeñas eminencias de las prolongaciones que aparecen brillantes en la imagen.

tante por segundo. Una potencia de cálculo inmensa, que permite representar, desde la célula, los detalles de los componentes de una columna cortical de forma simultánea.

Previamente hubo que configurar y programar la máquina, tarea que más tiempo requirió por parte del equipo del proyecto. Con el apoyo de nuestro socio colaborador estratégico IBM desarrollamos programas que permiten recopilar, pulsando una tecla, toda la información disponible de una neurona y generar a partir de ahí un modelo de ordenador. Ello incluye, entre otras características, su aspecto externo, sus propiedades eléctricas y su dotación genética. Cuanta más información biológica se halle disponible, tanto más fácil le resultará al ordenador desarrollar la simulación.

Estudios virtuales de medicamentos

Nuestro superordenador calcula la actividad de los canales de iones simulados en distintas secciones de cada una de las neuronas simuladas. Eso permite representar con precisión la actividad de una neurona real en el cerebro. De forma inversa, el resultado del ordenador puede someterse a comprobación y ajustarse mediante su comparación con los datos biológicos propiamente dichos, pues la calidad del modelo se demuestra en función del grado de exactitud con que se reproduce un experimento de laboratorio en el ordenador.

A finales de 2007 concluyó la primera fase del proyecto Blue Brain. Habíamos desarrollado un método para consolidar multitud de datos en un modelo de corteza cerebral válido para todos los tipos de células nerviosas, tal y como los conocemos merced a los experimentos de laboratorio. Ahora conocemos, con notable precisión, qué datos resultan imprescindibles para la simulación. Nuestro modelo describe una sección de la corteza cerebral con gran exactitud, desde los canales de iones hasta la actividad de partes completas de tejido cerebral. Blue Brain representa la primera demostración de que la investigación basada en simulaciones constituye una opción válida para la neurociencia.

Del milímetro cúbico de tejido cerebral virtual en toda su finura celular hasta la comprensión de la compleja bioquímica molecular de un cerebro humano completo media un largo camino. Solo la cantidad de neuronas involucradas en el segundo caso es 10 millones de veces superior a la de nuestro modelo. No obstante, es posible que, de aquí a unos años, el proyecto Blue Brain ofrezca a los científicos y médicos un laboratorio virtual donde investigar de forma informatizada las causas de patologías neurológicas y la eficacia de novedosos medicamentos para tratarlas. De esta forma, la simulación no solo contribuiría a una mejor comprensión del sistema cerebral, sino que también haría cada vez más prescindibles los experimentos con animales.

Felix Schürmann, doctor en físicas, dirige el Proyecto Blue Brain en el Instituto Brain Mind de la Escuela Politécnica Federal de Lausana.

Próximos pasos

El equipo de Henry Markram concentra sus esfuerzos en descender a niveles moleculares más profundos y aplicar la metodología empleada a otras regiones cerebrales. Un modelo de un cerebro de rata abriría nuevos horizontes para comprobar teorías sobre el aprendizaje y la memoria. Contribuiría también a descubrir nuevos mecanismos para el tratamiento de enfermedades neurológicas. El objetivo final es la integración del conocimiento existente del cerebro en un modelo informático que pueda ponerse a disposición de la investigación mundial.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

THE BLUE BRAIN PROJECT. H. Markram en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 7, págs. 153-160, 2006.

FUNCIONES

Tras la pista de la conciencia

¿Qué sucede en el cerebro cuando percibimos de manera consciente? ¿Se activan áreas especializadas o se produce un trabajo conjunto de conexiones neuronales dispersas?

CHRISTIAN WOLF

RESUMEN

¿Local o global?

1 Desde hace décadas, se buscan los correlatos neuronales de la conciencia.

2 Se han identificado diversas áreas cerebrales delimitadas que participan en la percepción consciente.

3 Algunas investigaciones sugieren que la conciencia se basa en la activación sincronizada de conexiones neuronales dispersas.

No todas las informaciones con las que nos bombardea el entorno alcanzan nuestra conciencia. El cerebro procesa muchos de los estímulos que nos llegan, sobre todo los más cortos, sin que nos demos cuenta.

Desde hace décadas, todo tipo de científicos, desde neurólogos hasta filósofos, van en busca de los correlatos neuronales de la conciencia. Es decir, de las actividades y los subsistemas del encéfalo que generan experiencias conscientes. Al principio, numerosos científicos creían que existían áreas limitadas y específicas del cerebro destinadas a la percepción consciente. Según estudios más recientes, parece más importante la activación breve y simultánea de conexiones neuronales disgregadas.

Para descubrir cómo se producen las experiencias de percepción subjetivas, los investigadores comparan la reacción de las células ante una señal de entrada consciente e inconsciente. Para ello, suelen utilizar un procedimiento típico en psicología: el enmascaramiento visual. Cuando en una pantalla se muestra el destello de una figura, por ejemplo un cuadrado, y acto seguido se sustituye por otra, pongamos un círculo, el primer estímulo permanece inconsciente. De este modo, los neurólogos identifican regiones cerebrales que se estimulan solo mediante la entrada de información subjetiva. En 2006, Hakwan Lau y Richard Passingham, de la Universidad de Oxford, comprobaron que para la percepción consciente solo se activan zonas concretas de la corteza prefrontal. En sus experimentos presentaron un estímulo objetivo (un cuadrado o un rombo) a 14 probandos sanos; inmediatamente después les mostraron una máscara, es decir, una figura que se solapaba con el contorno del estímulo objetivo, de manera que camuflaba a este último. Los sujetos debían decir cada vez qué figura habían visto antes.

A continuación, los investigadores variaron el tiempo que separaba en estímulo del otro.

VENTANA ABIERTA AL INTERIOR
Solo percibimos de forma consciente una pequeña parte del mundo, pero nuestra materia gris procesa numerosos estímulos inadvertidos.

© FOTOLIA / JUANJO TUGORES

Electroencefalografía (EEG)

Mediante electrodos, este método mide la distribución de actividad en el cerebro en tiempo real. El potencial eléctrico derivado del cuero cabelludo crea fluctuaciones de tensión de frecuencias distintas. Estas oscilan entre 1 y 100 Hz por segundo. Los diversos espectros de frecuencias (ondas beta o gama), se relacionan con grados de lucidez y conciencia.

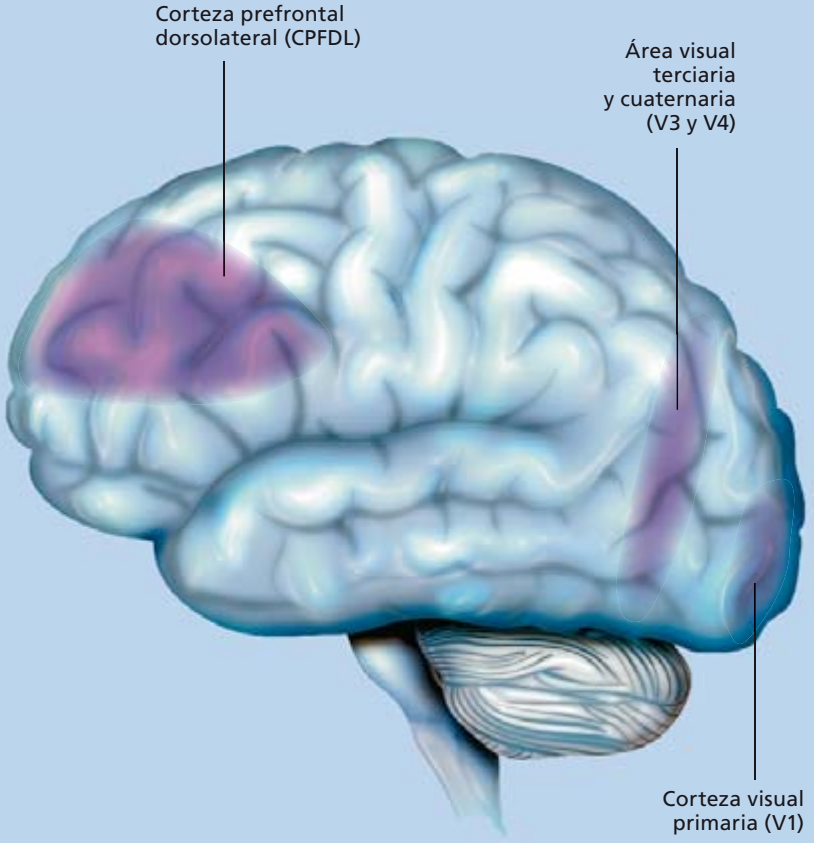
Resultado: los probandos indicaban el mismo número de estímulos correctos (un cuadrado o un rombo) tanto si la máscara aparecía en pantalla 33 o 100 milisegundos después. Ahora bien, a mayor intervalo, mayor era la conciencia del estímulo objetivo. Tras el enmascaramiento, los probandos decían la figura al azar, la mayoría de ellos con acierto, pues su cerebro había procesado el estímulo de forma inconsciente.

Durante el experimento, los científicos registraron la actividad cerebral de los sujetos con imágenes por resonancia magnética funcional (IRMf). Se demostró que sobre todo la corteza prefrontal dorsolateral (CPFDL) se activaba con mayor intensidad cuando el intervalo de tiempo entre el estímulo objetivo y la máscara era mayor. Ambos investigadores concluyeron que la función de la CPFDL es de gran relevancia en la percepción consciente. No obstante, el aumento

Áreas de percepción consciente

La corteza prefontal se encuentra en la zona frontal del encéfalo. Aquí se reciben las informaciones sensoriales procesadas que provienen de otras regiones cerebrales (de la retina posterior, por ejemplo) y se conectan con la memoria y valoraciones emocionales. Una subsección, la corteza prefrontal dorsolateral (CPFDL), podría ser de gran importancia en la percepción consciente. Asimismo, la actividad en las áreas visuales V3 y V4 puede significar visión consciente, mientras que la corteza visual primaria (V1) se activa del mismo modo durante la percepción inconsciente.

PROYECCIÓN CEREBRAL
La información sensorial visual alcanza la corteza prefrontal a través de las áreas de la corteza visual (como V1, V3 y V4).



GEHIRN & GEIST / MEGANIM

Ver sin saberlo

Los pacientes con «visión ciega» han perdido la capacidad de visión consciente a causa de una lesión cerebral; sienten que son ciegos. Sin embargo, si se les pide que indiquen dónde se encuentra un estímulo, suelen acertar con más frecuencia de lo que lo haría alguien que responde al azar. Por tal motivo, los expertos han denominado esta dolencia «visión ciega»: los afectados tienen la corteza visual primaria dañada, empero conservan la función de su retina; también presentan las otras vías de procesamiento intactas, por lo que pueden registrar informaciones visuales de forma inconsciente.

de actividad en esa zona podría reflejar también un mayor trabajo cognitivo, como la determinación del estímulo objetivo, no la experiencia consciente del estímulo en sí.

Foco sobre el sistema visual

Otro estudio sugiere que la base neurológica de la conciencia se establece en estadios de procesamiento anteriores. En 2005, un equipo de investigadores liderados por Peter Tse, del Colegio Darthmouth en Hanover, estudiaron con detalle la corteza visual del lóbulo occipital. Los científicos buscaban las zonas cerebrales que al percibir algún elemento de forma consciente reaccionaran con más fuerza que con un objeto enmascarado.

Para el análisis escanearon con IRMf los cerebros de 17 voluntarios, mientras les presentaban figuras geométricas que podían percibirse más o menos de forma consciente. Si bien es verdad que encontraron respuestas neuronales al estímulo objetivo en casi todas las regiones visuales de la corteza, solo las del lóbulo occipital se hallaban relacionadas con la percepción consciente de los estímulos.

Las áreas cerebrales jerárquicamente más bajas en el proceso de información visual (la corteza visual primaria, por ejemplo) no se tuvieron en cuenta, ya que reaccionaban siempre igual, tanto si los objetos se habían percibido de forma consciente o inconsciente. No obstante, se activaron áreas cerebrales situadas en una posición más alta dentro de la jerarquía, como el área visual terciaria y cuaternaria (V3 y V4), las cuales parecían asociadas con la visión consciente.

Los investigadores del equipo de Tse remarcan que sus resultados se refieren solo a estudios con estímulos simples. La percepción consciente de objetos más complejos (un rostro, por ejemplo) requiere el trabajo de áreas cerebrales adicionales situadas fuera del lóbulo occipital.

Ahora bien ¿son regiones cerebrales concretas las que se ocupan en realidad de las percepciones conscientes? Un equipo dirigido por Lucia Melloni, de la Universidad de Fráncfort, estudió otra hipótesis: la percepción inconsciente activa regiones cerebrales cercanas; en la consciente, en cambio, participan áreas distribuidas por la corteza cerebral.

En primer lugar, los científicos quisieron asegurarse de que los estímulos visuales, que enmascararon, llegaban al cerebro del probando. Para ello, 20 participantes en el experimento debían indicar, pulsando un botón, si la palabra mostrada en la pantalla se refería a un objeto natural (perro) o artificial (casa). Sin que lo supieran los participantes, los investigadores presentaban otro término enmascarado que podía concordar semánticamente con la palabra final. El resultado fue que los voluntarios necesitaban más tiempo para responder cuando las palabras visibles e invisibles no pertenecían a la misma categoría. Los científicos concluyeron que los conceptos enmascarados habían sido procesados; de lo contrario, no habrían tenido ese efecto en los sujetos.

Durante el experimento, 15 participantes debían comparar una «palabra ejemplo», presentada previamente, con una «palabra test», y decidir, presionando un botón, si ambas eran idénticas o no. Melloni y su equipo enmascararon la palabra ejemplo, que habían visto los voluntarios durante 33 milisegundos, por medio de estímulos luminosos antes y después de mostrarla. Dependiendo de la luminosidad, la palabra ejemplo entraba o no en la conciencia de los participantes.

Para estudiar el proceso temporal de las actividades cerebrales, se utilizó la electroencefalografía (EGG). Tanto en el proceso consciente como en el inconsciente, en general observaron patrones de actividad muy parecidos, con una excepción: si los estímulos se percibían de forma consciente, entre 40 y 180 milisegundos después de la aparición de la palabra prueba, las ondas gama (señales eléctricas con una frecuencia superior a 30 Hz) comenzaban a vibrar de forma simultánea por toda la corteza cerebral. Tal reacción se denomina sincronización de la actividad cerebral. Debido a que a su vez la intensidad de la onda gama era igual, se cree que la diferencia esencial entre la percepción consciente e inconsciente se halla en la combinación temporal de regiones distintas de la corteza cerebral. Según Melloni y su equipo, no está claro si la breve y precoz sincronización en sí ya representa el correlato neuronal de la conciencia o si esta nace de otros procesos que derivan en una actividad rítmica coordinada.

Francis Crick y Christof Koch suponían ya en 1990, que las ondas sincronizadas de 40 Hz de conexiones de células nerviosas representaban el correlato neuronal de la conciencia. Melloni y su equipo pueden fundamentar tal teoría hoy en día con su investigación, ya que demuestra la amplitud de la orquesta neuronal al percibir algo de forma consciente.

Christian Wolf *es doctor en filosofía y periodista científico.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

VISIBILITY, VISUAL AWARENESS, AND VISUAL MASKING OF SIMPLE UNATTENDED TARGETS ARE CONFINED TO AREAS IN THE OCCIPITAL CORTEX BEYOND HUMAN V1/V2. P. U. Tse et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, n.º 47, págs. 17.178-17.183, 2005.

SYNCHRONIZATION OF NEURAL ACTIVITY ACROSS CORTICAL AREAS CORRELATES WITH CONSCIOUS PERCEPTION. L. Melloni et al. en *Journal of Neuroscience*, vol. 27, n.º 11, págs. 2858-2865, 2007.

LA RED NEURONAL POR DEFECTO. M. E. Raichle en *Investigación y Ciencia*, n.º 404, mayo 2010.

CIEGOS CON VISIÓN. B. De Gelder, en *Investigación y Ciencia*, n.º 406, julio 2010.

FUNCIONES

La melodía de las circunvoluciones

A lo largo de la historia, los científicos han intentado descifrar el enigma eterno: la clave del talento. El cerebro de los pianistas podría albergar la respuesta

CHARLES T. AMBROSE

RESUMEN

Cerebro y genialidad

1 Los avances en el conocimiento de la estructura y funcionamiento del cerebro han permitido relacionar sus transformaciones con capacidades específicas.

2 El proceso para pulir las habilidades motrices puede tener paralelismo con el modo en que aumenta el almacenamiento memorístico.

3 Pese a que el incremento de las sinapsis y la eficiencia sináptica en las áreas motrices explican parte del virtuosismo al piano, también debería considerarse la neurogénesis.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 47

Planteamos la eterna pregunta: ¿cómo se explica la existencia de personas sumamente inteligentes y de enorme talento? Hace tres siglos, los frenólogos pensaban que las proporciones y abultamientos del cráneo podían distinguir a genios de criminales. Al examinar una sociedad psicológica alemana la cabeza de Charles Darwin, uno de sus miembros declaró que presentaba la «protuberancia de la veneración» tan desarrollada como para valerle a diez sacerdotes. En la Europa y Norteamérica del siglo XIX, varios académicos distinguidos, entre ellos Gauss, Broca, Gall, Pavlov, Osler y otros, legaron su cerebro para el estudio anatómico; algunos con la probable esperanza de dejar la confirmación póstuma de su genialidad.

Al inicio, los anatomistas comparaban el peso bruto y el volumen del cerebro en su conjunto, mientras que con los lóbulos y las circunvoluciones superficiales hacían lo que buenamente podían. Con la llegada de la anatomía microscópica consiguieron investigar diferencias histológicas, mas en 1928 los investigadores llegaron a la conclusión de que los primeros estudios no proporcionaban «una base a partir de la que [se pudieran] inferir capacidades mentales». Sin embargo, neurofisiólogos de la época empezaban a identificar regiones específicas del encéfalo responsables de la función motriz general y la actividad sensorial. En los últimos decenios, los neurohistólogos han desarrollado la citoarquitectura, clasificación que les permite contar neuronas y células de apoyo (oligodendrocitos, astrocitos y células gliales) en distintas áreas cerebrales.

Durante el decenio pasado, las imágenes cerebrales obtenidas por tomografía de emisión de positrones (TEP) y por resonancia magnética funcional (RMf) han permitido localizar, de forma no invasiva, funciones y respuestas diversas. Pero incluso provistos con tales herramientas, el enigma persiste: ¿dónde se origina el talento?

Órganos cerebrales sin igual

Albert Einstein, quien falleciera en 1955 en Princeton a los 76 años, es el genio moderno más venerado. Sin embargo, su cerebro tuvo un destino tortuoso: durante varios años permaneció en un frasco con formaldehído guardado en un armario de Kansas; de ahí fue trasladado a Berkeley, y en la actualidad se conserva en Hamilton. En la Universidad McMaster de dicha localidad estadounidense, el cerebro de Einstein se comparó con los encéfalos de un grupo de varones de edades similares. El órgano cerebral del físico figuraba dentro de los límites normales, excepto en los lóbulos parietales (región responsable de la cognición visuoespacial y del pensamiento mate-

AP PHOTO / *AMERICAN SCIENTIST*

CEREBROS VIRTUOSOS
A los 21 años, el pianista Lang Lang debutó en el Carnegie Hall. Las investigaciones revelan cómo la adquisición de habilidades específicas se asocia con cambios en la estructura del cerebro. ¿Qué podríamos descubrir si analizáramos el encéfalo de este virtuoso del piano?

mático, que eran un centímetro más anchos —un 15 por ciento— que los del grupo de control. Según la neurocientífica Sandra F. Witelson, con los conocimientos de esa época sobre el desarrollo del cerebro es probable que ya se distinguiera la forma singular del encéfalo del científico.

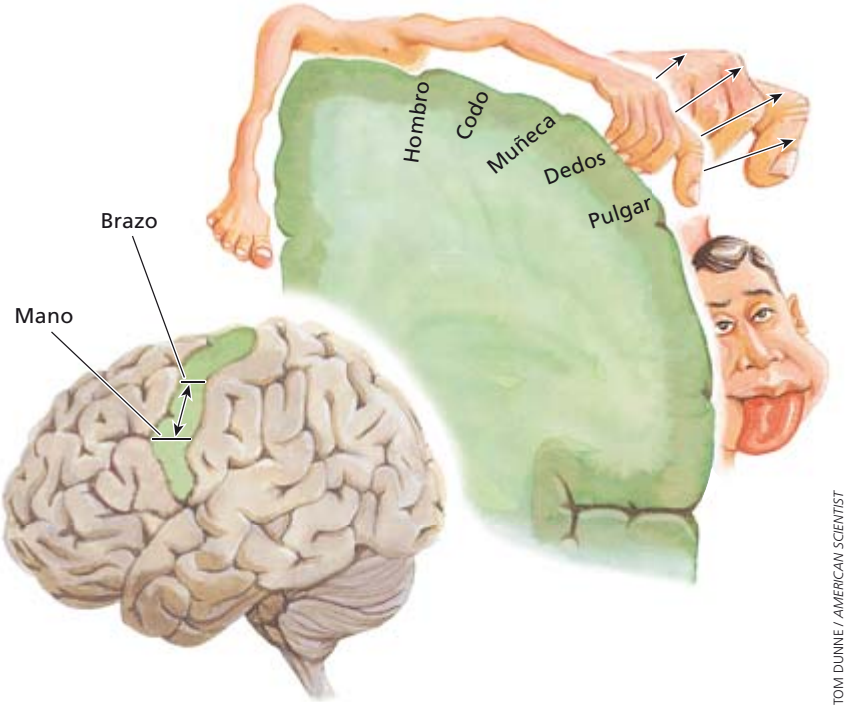
Cada uno de los lóbulos parietales posteriores de Einstein constaba de un compartimiento diferenciado, en vez de los dos característicos separados por la cisura de Silvio. Con anterioridad, en la Universidad de California en Berkeley, Marian Diamond y sus colaboradores habían informado de que la isocorteza (las seis capas exteriores de materia gris) del lóbulo parietal izquierdo de Einstein (el área 9 de Brodmann) contenía un 77 por ciento más de células gliales por neurona que los cerebros de otros 11 varones *normales* de entre 47 y 80 años de edad. Tal proporción sugería una respuesta de las células gliales a una mayor necesidad metabólica neuronal y podría reflejar el mayor uso de dicho tejido en la expresión de sus poco comunes poderes conceptuales.

Sin duda, las personas con una capacidad musical desarrollada, caso de los compositores, directores y concertistas eminentes, pueden competir en talla intelectual con los genios matemáticos. Los grandes pianistas combinan

varias funciones: oído, percepción, apreciación, memoria y ejecución. En el sentido del oído se implica la corteza auditiva primaria, la cual se encuentra en gran medida en la región anteromedial de la circunvolución de Heschl (giro transverso anterior del lóbulo temporal). Un estudio publicado en *Nature Neuroscience* en 2002 afirma que este giro es 2,3 veces más grande y el doble de activo en el cerebro de músicos profesionales que el de aquellos que no lo son, dato que sugiere una plasticidad en el cerebro humano que se desarrolla bajo condiciones de intensa formación musical. La naturaleza histológica de tal aumento sigue pendiente de estudio.

Volviendo al repaso cronológico, a mediados del siglo XIX, el biólogo y médico Jean Pierre Flourens (1794-1867) sostenía que las funciones cognitivas son la actividad integrada de todo el cerebro. En fecha más reciente, el premio Nobel Eric Kandel y el psiquiatra Larry Squire reiteraron que la memoria no es una facultad unitaria de la mente, sino que se compone de sistemas múltiples, cada uno con lógica y neuroanatomía propia. Así, la memoria contiene dos sistemas, a corto y a largo plazo, los cuales se ubican en regiones del cerebro distintas. La memoria a largo plazo consta de dos tipos: el recuerdo explícito, declarativo y consciente (relacionado con experiencias y acontecimientos), y el recuerdo implícito, no declarativo e inconsciente (asociado con las habilidades motoras, hábitos, etcétera). Varios autores han localizado ambos tipos en la isocorteza de las regiones cerebrales *de arriba*, en concreto, en las cortezas frontal y parietal, así como en los lóbulos temporales mediales. El estudio sobre el almacenamiento de la memoria se complica con la hipótesis de que recordar «qué» y «cómo» son cuestiones dispares que pueden hallarse localizadas en regiones diferentes de la isocorteza. En la actualidad se desconoce hasta qué punto se encuentran circunscritas las áreas de asociación de recuerdos específicos. No sabemos, por ejemplo, si la experiencia y el conocimiento memorizados de un estudio de Chopin reside en la misma región de la corteza que los de un preludio de Bach.

CORTEZA MOTRIZ
La adaptación pictórica del homúnculo motor de Wilder Penfield representa la cantidad de corteza motriz primaria dedicada a las partes del cuerpo. El entrenamiento intenso incrementa la representación cortical de la parte del cuerpo adiestrada, por ejemplo, en la región asociada con los dedos de un músico habilidoso.



TOM DUNNE / *AMERICAN SCIENTIST*

Sinapsis en las áreas motoras

La localización de funciones motrices comenzó cuando el neurólogo Marc Dax (1771-1837), compatriota de Flourens, informó de afasia en pacientes diestros que sufrían un derrame cerebral con hemiplejia derecha, es decir, incapacidad a causa de alguna lesión del hemisferio izquierdo. Varios decenios después, Paul Broca (1824-1880) corroboraba dicha observación, de tal suerte que el área motriz del habla en el hemisferio cerebral izquierdo fue denominada área de Broca (circunvolución frontal inferior izquierda).

Aunque los primeros neurofisiólogos se interesaron por la localización de las funciones sensoriales en el cerebro, en los últimos tiempos, la ciencia ha centrado su atención en la localización de la memoria. Mas, en comparación con la memoria y el oído (entendiendo por tal la compleja respuesta global a un estímulo auditivo), las funciones motoras resultan más fáciles de localizar y probablemente de investigar. Así, se han cartografiado en las áreas discretas de proyección sobre la superficie del hemisferio cerebral, como muestra el famoso homúnculo motor diseñado por el neurocirujano Wilder Penfield.

El proceso para pulir las habilidades motrices más delicadas puede tener paralelismo con la manera en cómo aumenta el almacenamiento memorístico. Los mecanismos propuestos para incrementar la memoria se han centrado en una de las dos explicaciones alternativas, no excluyentes. Por un lado, las sinapsis ya existentes pueden cambiar como resultado de alteraciones en la expresión génica local, de forma que producen nuevas proteínas y crece el número de vesículas cerca de la membrana presináptica. Por otro, pueden generarse nuevas sinapsis (sinaptogénesis). Los estudios sobre la memoria

CORBIS / *AMERICAN SCIENTIST*

EXPANSIÓN DE MATERIA GRIS En 2004 se entrenó a voluntarios durante tres meses para dominar unos juegos malabares básicos. Mediante RMf se confirmó la expansión de materia gris en dos áreas localizadas de los cerebros.

han prestado hasta ahora poca atención a una tercera posibilidad: la neurogénesis. En mi opinión, el aumento de las sinapsis y el incremento de la eficiencia sináptica en las áreas motrices clave puede explicar en parte el virtuosismo al piano, pero sugiero que también debería considerarse la neurogénesis.

La plasticidad del cerebro adulto

Hasta el decenio de los setenta del siglo XX, el dogma de la neurofisiología sostenía que la generación de neuronas nuevas en la mayor parte del cerebro se limitaba al período de la embriogénesis, salvo raras excepciones, como las células granulares del bulbo olfatorio y el hipocampo. Se creía, pues, que tras el nacimiento, la regeneración de las neuronas se limitaba a los nervios periféricos. Mas al comprobarse que todas las áreas corticales del cerebro presentaban plasticidad (cambios con el tiempo), las modulaciones en función y actividad se atribuyeron a los cambios sinápticos. Sin embargo, estudios recientes sugieren que la neurogénesis también puede desempeñar una función.

Se reconoce ahora que el cerebro humano posee una plasticidad extraordinaria, así como un potencial para restaurar una función perdida. Después de lesiones localizadas en el encéfalo, los déficit neurológicos a menudo se pueden mejorar con un entrenamiento especial. En pocas palabras, es posible provocar cambios en el cerebro de forma discrecional. Ahora bien, ¿qué esperaríamos encontrar en las personas sanas que realizan movimientos minuciosos mentalmente exigentes (como los mecanógrafos y los músicos)? ¿Desarrollan cambios morfológicos consistentes y apreciables en áreas motrices determinadas del cerebro?

Los pianistas siempre han sido considerados buenos candidatos para ese tipo de estudios. En los años veinte del siglo XX, Rudolf Klose examinó el cerebro de un joven pianista prodigio, Goswin Sökeland (1872-1900), mas solo informó sobre la morfología macroscópica («El tamaño del giro supramarginal resulta enorme»). Hoy

El estudio de la neurogénesis

Los siguientes nueve informes describen un aumento del encéfalo o del volumen de áreas corticales determinadas después de varios estímulos. En los cuatro primeros, los investigadores no tomaron en consideración la posibilidad de la neurogénesis; en los últimos cinco, sí.

1. A principios del decenio de los ochenta, William Greenough y sus colaboradores entrenaron a ratas adultas en laberintos. Descubrieron que los campos dendríticos de las neuronas piramidales de la corteza visual de los múridos habían aumentado con respecto al grupo de control. Las ratas entrenadas en tareas motrices complejas también presentaban mayor grosor de la corteza cerebelosa respecto a los roedores de control que se habían sometido a una actividad física mayor mediante dispositivos diversos, como ruedas de ejercicio. Según los autores, los resultados implicaban cambios en el número de sinapsis en el proceso de la memoria. Sin embargo, no continuaron con una investigación histológica concluyente.

2. Ya en los noventa, Gregg Recanzone y sus colaboradores entrenaron a monos para que discriminaran dos estímulos vibratorios aplicados en un dedo. Después de varios miles de ensayos descubrieron que el tamaño de la representación cortical del dedo entrenado se duplicaba con creces con respecto a las mismas áreas del resto de los dedos.

3. En 1995, Thomas Elbert utilizó técnicas de neuroimagen para estudiar a un grupo de violinistas diestros. Halló que la representación cortical de los dedos de la mano izquierda de dichos músicos de cuerda era mayor que en los sujetos de control (la mano derecha mueve el arco, por lo que hay mucho menos movimiento y estimulación de las yemas de los dedos).

4. Bogdon Draganski y sus colaboradores estudiaron en 2004, mediante escáneres de RMf, a jóvenes voluntarios que habían llegado a dominar los típicos juegos malabares tras tres meses de entrenamiento. Descubrieron que la sustancia gris se expandía en el área media temporal y en el surco intraparietal posterior izquierdo. La expansión disminuyó tres meses después.

5. En 1962, Joseph Altman realizó los primeros estudios neurológicos con marcado radiactivo. Inyectaba ^{3}H-timidina en lesiones provocadas en el cuerpo geniculado lateral de ratas adultas. Encontró marcadores en células gliales, en neuroblastos y en unas cuantas neuronas en el área de la lesión o cerca de ella. Juzgó que la presencia de neuroblastos marcados apoyaba un proceso de neurogénesis en el área reparada.

6. En el decenio de los ochenta, el laboratorio de Fernando Nottebohn informó de que en el cerebro anterior (*hyperstriatum*) del canario hembra el volumen de dos núcleos del control de voz (conjuntos funcionales de neuronas y células asociadas) aumentaba en el apogeo de la temporada de canto; luego disminuía para volver a aumentar durante la temporada de canto siguiente. El repertorio de melodías de los canarios cambia todos los años. A las aves se les inyectó ^{3}H-timidina, compuesto que se incorpora al ADN de células que se replican. En las aves que recibieron el marcador se comprobó que el aumento de volumen en un área en particular venía acompañado de células precursoras neuronales gliales, endoteliales y migratorias marcadas; todas ellas se interpretaron como signos de neurogénesis.

7. En 1998, Peter Ericksson y sus colaboradores inyectaron a cinco pacientes en fase terminal bromodesoxiuridina (BrdU), un nucleótido sintético que, al igual que la ^{3}H-timidina, se incorpora al ADN de células que se replican. Descubrieron que, tras su muerte

en día, un examen detallado del encéfalo de pianistas experimentados informaría sobre la topografía neuronal, además de otros detalles de la estructura, con lo que podrían conocerse las características distintivas de este giro tan «enorme» .

Una opinión extendida sobre la neurogénesis es que las neuronas nuevas pueden deberse a la transformación de células madre y su migración a lugares relevantes. La base fisiológica de tales cambios, no definida aún, podría implicar células accesorias adyacentes que liberan factores químicos, células endoteliales o ambas, las cuales estimularían el crecimiento de nuevos vasos circulatorios (angiogénesis).

Mayor irrigación

El neuropatólogo Alfred Meyer se refirió, en una nota a pie de página, a un trabajo de B. K. Hindze publicado hace unos 50 años, en el que demostraba que en el cerebro de las personas con capacidades excepcionales la irrigación arterial es más elaborada que en aquellos sujetos con capacidades mediocres. Sin embargo, dicho estudio era «demasiado limitado para permitirnos sacar conclusiones definitivas». En 1974 se describió el flujo sanguíneo del cerebro de pacientes con esquizofrenia crónica; otro estudio registró el flujo sanguíneo del hemisferio asociado con el habla y la lectura de personas normales (en ambas investigaciones se utilizó el método xenón-133 con 32 detectores colocados

(entre varias semanas y dos años después), ciertas células de la circunvolución dentada del hipocampo se hallaban marcadas con dos BrdU y con un marcador neuronal específico. Interpretaron los resultados como indicadores de génesis de nuevas neuronas a partir de células progenitoras que se dividen en el giro.

8. Un año después, en 1999, Elizabeth Gould y su equipo administraron a macacos adultos BrdU. Después de una semana encontraron neuronas maduras marcadas en las cortezas prefrontal, temporal inferior y parietal, lo que indicaba que las neuronas se añaden a la neocorteza de los primates en edad adulta. Los autores no consideraron los estudios previos de Altman y Nottebohn como definitivos o como pruebas de neurogénesis.

9. Por último, el trabajo de Marian Diamond y sus colaboradores en 2004 demostró que factores nutricionales y otras influencias ambientales afectaban al crecimiento continuo del cerebro humano después del nacimiento. Las ratas a las que proporcionaban juguetes y ruedas de ejercicio (entorno enriquecido) desarrollaban más células gliales por neurona en la corteza occipital. Observaron asimismo cambios en el tamaño del estroma neuronal, la densidad de neuronas, la longitud de las ramas dendríticas, la densidad dendrítica en la espina, la longitud de las sinapsis y los recuentos de células gliales.

junto a la cabeza del probando). En el último caso, los autores afirmaban que el flujo sanguíneo del cerebro se hallaba regulado en última instancia por la actividad metabólica del tejido neuronal. Fred Wolf y Frank Kirchhoff, del Instituto Max Planck, midieron en 2008 el flujo sanguíneo por RMf, tras lo que afirmaron que la actividad del astrocito afectaba al flujo sanguíneo local.

Todos estos estudios no explican si el aumento de la sangre se producía a través de capilares existentes o recién formados (estos últimos surgirían quizás en un procedimiento análogo a la angiogénesis tumoral). Una consideración recíproca es si el incremento del flujo sanguíneo en un área podría estimular en la misma un mayor desarrollo de neuronas o de astrocitos, tal como permite también que proliferen células malignas en ciertos tumores sólidos. Michael Chopp, de la Universidad de Nueva York, y sus colaboradores han examinado agentes que promueven la neurogénesis y la angiogénesis durante la recuperación de un derrame cerebral inducido en animales. Según sus resultados, las metaloproteinasas de la matriz expresadas en la vasculatura perinfarto son quimiotácticas para los neuroblastos que emigran de la zona subventricular. La angiogénesis fue supervisada por RM.

Coda

Los concertistas de piano representan un modelo humano de actividad motriz altamente integrada. El área motriz primaria de las manos y los brazos se encuentra en la circunvolución precentral del lóbulo frontal. Si una RMf de tal área revela en los pianistas profesionales un aumento del flujo sanguíneo, cabe preguntarse si ello se debe a neocapilares inducidos previamente por un péptido angiogénico; similar al factor de la angiogénesis derivado del macrófago o factor de necrosis tumoral alfa. La angiogénesis se ha estudiado en condiciones patológicas determinadas, como los tumores cerebrales (glioblastomas) y los casos de derrame. El presente artículo sugiere una función no patológica de la angiogénesis en cerebros sanos y estimulados.

Buscar un péptido (o péptidos) angiogénico ligado al talento en la neurogénesis sería difícil en pianistas experimentados: los concertistas de piano son escasos y venerados, por lo que podría contrariarles una investigación neuroquímica de sus cerebros. Además, sus extraordinarias habilidades motrices se desarrollan durante muchos años de práctica, por lo que el largo intervalo podría dificultar la identificación de un supuesto péptido angiogénico presente y activo solo en el inicio de los nuevos capilares. Por el contrario, parece verosímil, si nos basamos en trabajos como el de Nottebohn sobre el canto de los pájaros, que mantener un alto nivel de destreza al piano requiere la continua estimulación de un factor angiogénico con el fin de preservar un lecho capilar local desarrollado.

Charles T. Ambrose *se licenció en medicina en la Escuela Médica Johns Hopkins. Imparte microbiología patógena en la Universidad de Kentucky. Ha publicado extensamente sobre historia de la medicina.*

© American Scientist Magazine

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

LEARNING AND RECEPTIVE FIELD PLASTICITY. C. D. Gilbert en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the* USA, vol. 93, págs. 10.546-10.547, 1996.

THE EXCEPTIONAL BRAIN OF ALBERT EINSTEIN. S. F. Witelson, D. L. Kigar y T. Harvey en *The Lancet*, vol. 353, págs. 2149-2153, 1999.

NEUROSCIENCE: BREAKING DOWN SCIENTIFIC BARRIERS TO THE STUDY OF BRAIN AND MIND. E. R. Kandel y L. R. Squire en *Science*, vol. 290, págs. 1113-1120, 2000.

MORPHOLOGY OF HESCHL'S GYRUS REFLECTS ENHANCED ACTIVATION IN THE AUDITORY CORTEX OF MUSICIANS. P. Schneider et al. en *Nature Neuroscience*, vol. 5, págs. 688-694, 2002.

DENDRITIC PROTEIN SYNTHESIS, SYNAPTIC PLASTICITY, AND MEMORY. M. A. Sutton y E. M. Schuman en *Cell*, vol. 127, pág. 4958, 2006.

NEUROGENESIS, ANGIOGENESIS, AND MRI INDICES OF FUNCTIONAL RECOVERY FROM STROKE. M. Chopp, Z. G. Zhang y Q. Jiang en *Stroke*, vol. 38, págs. 827-831, 2007.

FUNCIONES

Recuerdos efímeros

Mantener por poco tiempo un número de teléfono en la cabeza, cocinar siguiendo una receta o jugar al Memory; nada de ello puede ejecutarse sin una memoria de trabajo en funcionamiento

CHRISTIAN WOLF

¿Recuerda usted todavía lo que acaba de leer en la cabecera de este artículo? Si la respuesta es afirmativa, usted disfruta de una memoria de trabajo en excelente estado de salud. Con la ayuda de esta memoria podemos mantener de forma pasajera en el recuerdo las informaciones recién recogidas. En el caso de que lo que haya leído le impresione especialmente, puede que obtengan incluso un lugar en su memoria a largo plazo, la cual, a diferencia de la memoria a corto plazo, dispone casi de una capacidad ilimitada. Recíprocamente, también podemos solicitar recuerdos de la memoria a largo plazo para que estén a nuestra disposición temporalmente en la memoria de trabajo, por ejemplo cuando queremos llevar a cabo una tarea determinada y para ello tenemos que echar mano de nuestros conocimientos.

La memoria de trabajo recibe este nombre debido a que su contenido se desvanece inmediatamente; tan pronto como deja de usarlo de forma activa o de repetirlo. Dicha memoria condiciona lo que en un momento determinado se encuentra presente en nuestra conciencia. Resulta imprescindible, además, para la realización de numerosas capacidades cognitivas: calcular mentalmente, deducir algo lógicamente, entender el lenguaje o hacer planes de actuación.

PARA EL MOMENTO
Para los recuerdos a corto plazo se pregunta a la memoria de trabajo. En este ejemplo concreto a aquella que se ocupa de las informaciones visuoespaciales.

GEHIRN & GEIST / MANFRED ZENTSCH

RESUMEN

Una memoria fugaz flexible

1 La memoria de trabajo retiene informaciones de forma pasajera y es imprescindible para muchas actividades mentales.

2 Según el modelo clásico, esta capacidad residiría en un almacén altamente especializado alojado en la corteza prefrontal.

3 Según los conocimientos actuales, por contra, esta memoria efímera surgiría cada vez de forma nueva, a partir de la actividad coordinada de distintas regiones cerebrales.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 42

Las personas con una memoria de trabajo dañada suelen tener problemas para realizar varias cosas de manera simultánea. A pesar de mantener intacta la memoria de larga duración, a algunas de ellas les resulta difícil memorizar por poco tiempo incluso tan solo dos cifras. En muchos casos hablan lenta y entrecortadamente.

¿Cómo está constituida esta memoria efímera? Durante las pasadas décadas quedó establecida entre los neuropsicólogos la idea de que funcionaba como una memoria ordenada de forma rígida con subunidades especializadas, entre otras, para informaciones acústicas o visuales. Sin embargo, los hallazgos señalan hacia otra dirección.

En tanto que modelo insignia de la psicología cognitiva, la memoria de trabajo emprendió su marcha triunfal en la década de los setenta del pasado siglo y remplazó a la teoría, hasta entonces dominante, de la memoria de corta duración. Hasta ese momento se había considerado la memoria a corto plazo como un sistema unitario que solo podía procesar una tarea después de otra. Esa idea cambió radicalmente cuando Alan Baddeley y Graham Hitch propusieron su modelo compuesto de la memoria de trabajo.

Burocracia en el cerebro

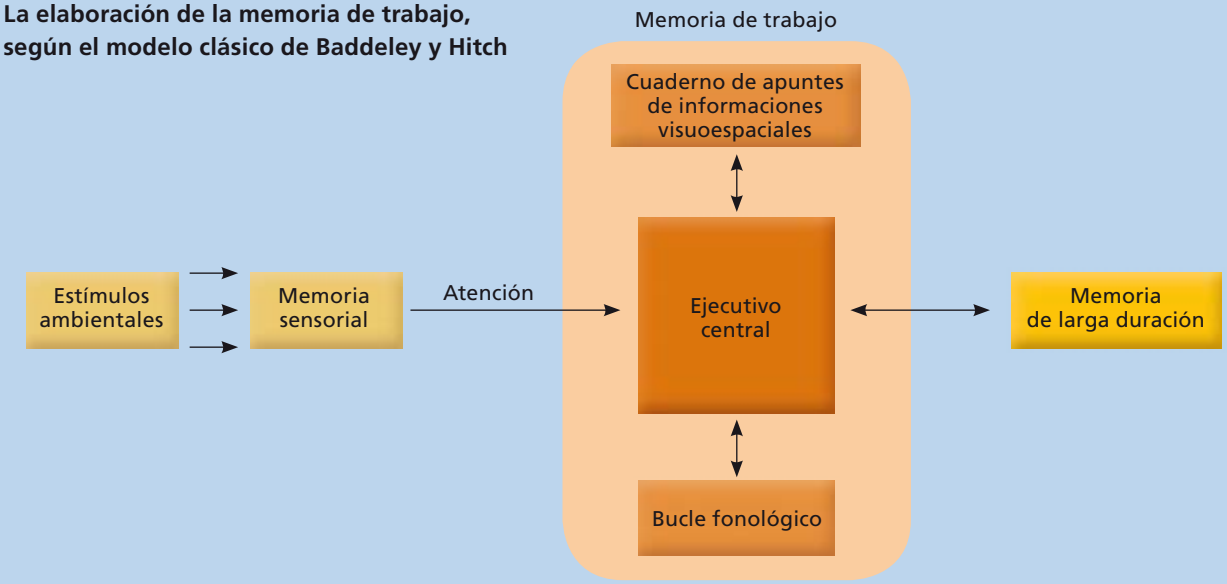
Los dos investigadores llegaron a la conclusión en varios estudios de que la memoria de corta duración sí que posibilitaba realizar dos cosas distintas a la vez. Así, la mayoría de las personas era capaz de sumar dos cifras mientras memorizaban una cadena de palabras. Sin embargo, con dos tareas paralelas del mismo tipo la memoria de trabajo se desenvolvía mal o incluso no se las arreglaba en absoluto. Baddeley y Hitch supusieron por ello que dicha memoria estaba formada por diferentes componentes. En su núcleo se encontraba el ejecutivo central, cuya misión consistía, por un lado, en controlar lo almacenado en las unidades de memoria subordinadas y, por otro, en conectar la memoria de trabajo con la de larga duración.

Según dicho modelo, los sistemas subordinados almacenan o bien informaciones verbales o bien espaciales. El lazo fonológico, cuya capacidad se limita a unos pocos segundos, retiene secuencias sonoras. Cada vez que nos decimos internamente una información o un contenido (un número de teléfono, por ejemplo) ponemos en marcha ese lazo y evitamos su olvido. El «cuaderno de apuntes» visuoespacial almacena, independientemente del anterior, informaciones

Un modelo anticuado

Durante décadas, el modelo de múltiples almacenes, de los psicólogos Alan Baddeley y Graham Hitch, configuró nuestra idea de la memoria de trabajo. Según este modelo, solo una pequeña parte de los estímulos ambientales, almacenados de forma inconsciente en la memoria sensorial, estimula nuestra atención y alcanza la memoria de trabajo. Allí, el ejecutivo central controla lo que se dirige a las unidades de memoria especializadas: o bien al lazo fonológico, cuya capacidad se limita a unos pocos segundos, mantiene las secuencias sonoras; o bien al bloque de noticias visuoespaciales, que memoriza, por ejemplo, las posiciones de los objetos. Si la información tiene una cierta importancia, puede alcanzar la memoria de larga duración. Sin embargo, un modelo tal, basado en la estricta división en distintos componentes, no concuerda con los hechos que realmente acontecen en el cerebro.

La elaboración de la memoria de trabajo, según el modelo clásico de Baddeley y Hitch



espaciales (la posición de un objeto o detalles como su forma o su color). También sus capacidades se agotan con rapidez, pues con frecuencia no nos percatamos siquiera de los grandes cambios que acontecen en escenas previamente vistas. Más tarde Baddeley amplió el modelo con la memoria episódica, la cual podía mantener no solo relaciones verbales o espaciales sino también semánticas.

Respuestas diferidas

Los neurobiólogos completaron estas reflexiones teóricas. En 1973, el neurocientífico Joaquín Fuster, que en la actualidad trabaja en la Universidad de California, en Los Ángeles, investigó la memoria de trabajo en los monos utilizando una prueba de respuestas diferidas (en inglés *delayed response task*). La prueba consiste en mantener un estímulo en la memoria y, una vez transcurrido un tiempo determinado, reaccionar a él. En el experimento de Fuster los monos memorizaban un lugar en el que habían visto comida. Mientras esto ocurría, Fuster registró en los animales una actividad intensificada en las neuronas de la corteza prefrontal (CPF). La suposición evidente fue que esta actividad podría ser la representación neuronal del lugar con comida temporalmente escondido.

A finales de la década de los ochenta del pasado siglo, la neurobióloga Patricia Goldman-Rakic, de la Escuela Universitaria de Medicina de Yale, en New Haven (EE.UU.), llegó a la conclusión de que la actividad en la CPF durante el recuerdo a corto plazo y el modelo de almacenaje de Baddeley y Hitch podrían estar describiendo el mismo fenómeno. Según esta idea, la memoria de trabajo realizaría su actividad rememorativa con la ayuda de unidades de memoria especializadas, cuyo fundamento neuronal decisivo se encontraría en distintas subáreas de la CPF. Este modelo estándar pareció que se probaba con el hecho, bien documentado, de que los daños en la corteza prefrontal van

GETTY IMAGES / MANFRED ZENTSCH

¡NO HAGA TRAMPAS!
¿Es esta la misma imagen que había puesto al descubierto la mano del jugador al comienzo de este artículo?

acompañados de limitaciones de la memoria de trabajo. Sin embargo, se encuentra fuertemente cuestionado en la actualidad.

Así, Bradley Postle, de la Universidad de Wisconsin-Madison, propuso en 2006 una nueva teoría de la memoria de trabajo basándose en una serie de hallazgos empíricos novedosos. Nuestra memoria a corto plazo no sería en absoluto un conjunto fijamente ordenado de unidades especializadas. Y tampoco la CPF se estructura en forma de subunidades neurobiológicas progresivamente más pequeñas. En último término, la memoria de trabajo se compondría, según ese modelo, de incontables unidades, cada una de ellas con el cometido de elaborar una forma determinada de información.

En apoyo de la teoría anterior, los estudios experimentales muestran que la actividad en la corteza prefrontal no cambia en absoluto en función de las distintas informaciones que el sujeto recuerda. Y, por otro lado, las que sí reaccionan de forma diferente son determinadas áreas profundas del cerebro, que son precisamente aquellos campos que participaron en un principio en la percepción de los respectivos estímulos.

Postle mismo contribuyó en el año 2000, junto a sus colaboradores, a este nuevo punto de vista. Dicha aportación consistió en la realización de una serie de experimentos que tenían como finalidad principal aclarar si la corteza prefrontal disponía de redes separadas que se activan de forma diferente dependiendo de si se trata de posiciones espaciales o de otras propiedades de los objetos. Para estudiar la memoria para las localizaciones, los científicos presentaron a sus voluntarios una serie de círculos consecutivos que iban apareciendo en una de nueve posiciones distintas en una pantalla. Tan pronto como una posición se repetía, los voluntarios tenían que apretar un botón. Por otro lado, la memoria de trabajo para objetos individuales fue puesta a prueba por los investigadores haciendo aparecer una serie de formas abstractas en el monitor. También aquí los sujetos tenían que apretar un botón cuando surgía una repetición. Mientras se llevaban a cabo las diferentes tareas, el equipo de Postle examinaba el cerebro de los participantes mediante resonancia magnética funcional (RMf).

Como los resultados pusieron de manifiesto, la corteza prefrontal carecía de áreas especializadas: daba igual el tipo de informaciones que los voluntarios recordasen —o bien localización o bien identidad del objeto—, las actividades recogidas en la RMf eran muy semejantes. Por el contrario, las áreas perceptivas situadas en partes posteriores del cerebro también actuaban de forma especializada en relación con los recuerdos: regiones como los giros fusiforme,

lingual y el temporal inferior reaccionaban de forma más intensa cuando se trataba de recordar las propiedades de un objeto y no su posición espacial.

A similares resultados llegó en 2004 el equipo de Charan Ranganath, de la Universidad de California, en Davis. En una unidad de experimentación, sus 15 voluntarios memorizaron fotos de ocho rostros, ocho casas y de ocho parejas rostro-casa. A continuación, mientras se les hacía un escáner, tenían que llevar a cabo dos tareas diferentes: en la primera, veían en primer lugar una de las fotos y tenían que memorizarla en siete segundos. A continuación, pulsando un botón, debían decidir si una segunda foto que les era presentada coincidía con la primera. En la segunda tarea entraban en acción las parejas rostro-casa memorizadas. Los voluntarios, cuando aparecía una imagen, tenían que pensar en la parte complementaria —rostro o casa— que faltaba y tenerla durante siete segundos en la memoria. De esta manera, en vez de una foto evocaban una asociación. Acto seguido aparecía una segunda imagen en el monitor y los voluntarios tenían que decidir si pertenecía o no a la pareja original.

Estos dos experimentos probaron que los recuerdos de los objetos previamente vistos coincidían con una actividad elevada en dos regiones del lóbulo temporal inferior. Cuando, durante la pausa, los voluntarios mantenían en la memoria los rostros vistos se producía una actividad intensa del área especializada en el reconocimiento facial: el giro fusiforme. A su vez, cuando se rememoraban las casas se activaban con intensidad las neuronas del giro hipocampal. Se excitaban respectivamente, por consiguiente, aquellas áreas que también se ocupaban de las percepciones y no campos especializados de la corteza prefrontal.

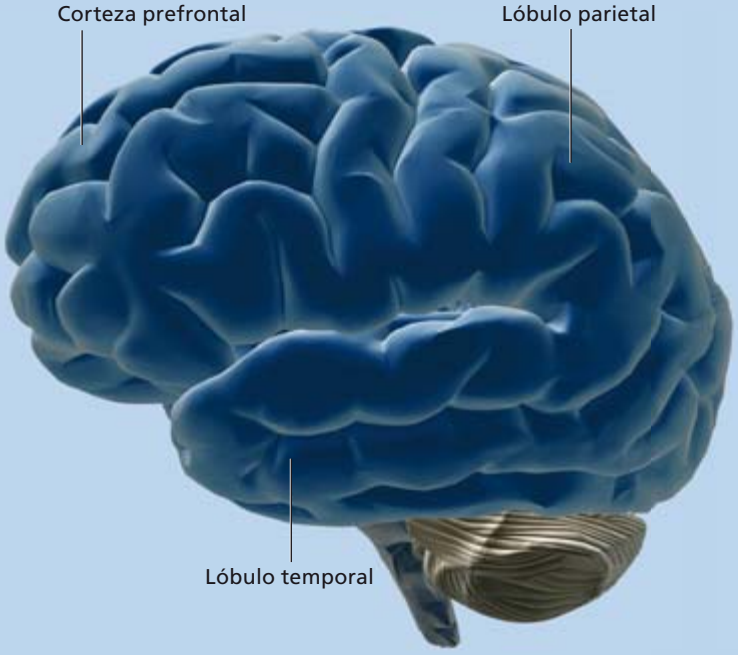
Prestar atención en vez de memorizar

Por otra parte, algunos investigadores tienen serias dudas en torno a que la excitación neuronal de la CPF se corresponda con una memoria intermedia. Muy posiblemente esa área cerebral se ocupa más bien, a través de la atención selectiva, de que retengamos determinada información durante un corto período temporal.

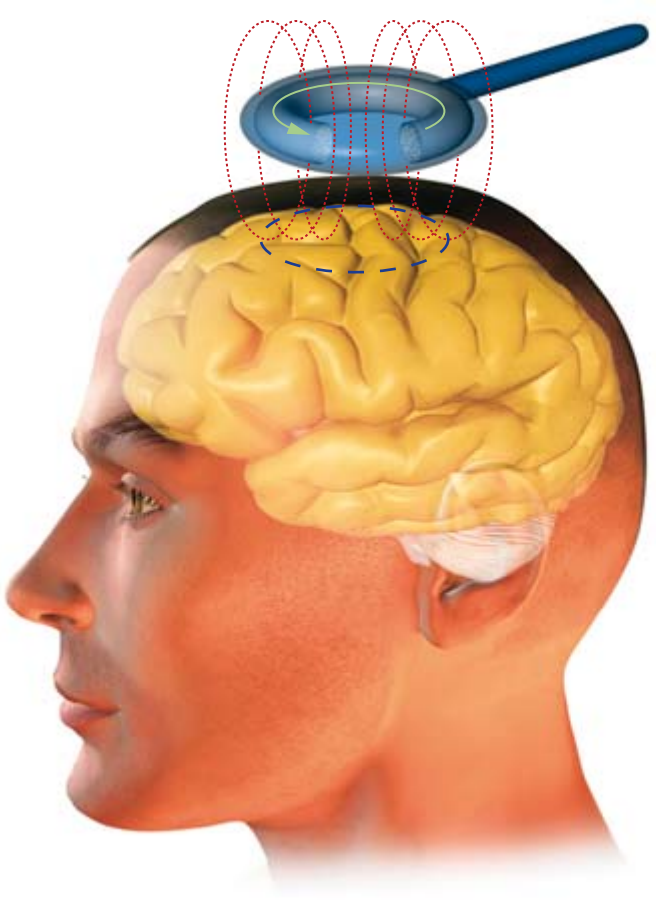
En 2004, Mikhail Lebedev y sus colaboradores del Instituto Nacional de Salud Mental en Bethesda (EE.UU.), postularon dicha hipótesis. Mientras que sus animales de experimentación —dos monos— miraban fijamente un punto, un círculo daba vueltas alrededor de dicho punto y después se paraba. Si el círculo se hacía entonces

Las bases neuronales del recordar momentáneo

Durante mucho tiempo se consideró que la corteza prefrontal era el fundamento neuronal decisivo para la memoria de trabajo. Los estudios actuales avanzan en otra dirección: la corteza prefrontal solo selecciona lo que se mantiene a corto plazo. Dependiendo de la naturaleza de esos datos, distintas áreas situadas en la parte posterior del cerebro se ocupan a continuación de memorizarlos, y también de percibir los estímulos. Así, por ejemplo, se estimulan partes del lóbulo parietal cuando uno recuerda la posición de un objeto; y, a su vez, se estimulan regiones del lóbulo temporal cuando se memoriza el objeto del que se trata.



GEHRN & GEIST / MEGANIM



GEHIRN & GEIST / MEGANIM

BAJO CORRIENTE

La estimulación magnética transcraneal (EMT) es un método indoloro y no invasivo con el que se pueden inhibir o estimular de forma dirigida campos cerebrales concretos. Una bobina metálica conectada a un condensador produce un intenso campo magnético sobre la cabeza, el cual a su vez origina un flujo de corriente en el tejido nervioso subyacente. Los neurocientíficos recurren gustosamente a este método, pues permite investigar la función de pequeñas áreas cerebrales al inhibirlas de forma pasajera.

más brillante y a continuación desaparecía, eso señalaba a los animales que tenían que dirigir los ojos a la posición original del círculo, de la que había partido (se investigaba aquí, por tanto, el recuerdo). Si, por el contrario, el círculo se hacía solo más oscuro, tenían que mantener la mirada en su posición actual (lo que aquí se investigaba era el gobierno de la atención).

Los animales realizaron ambas tareas con éxito. La medición de la actividad de neuronas individuales de la corteza prefrontal demostró que la mayoría de las células nerviosas representaba el respectivo lugar actual del círculo, cuando los animales dirigían hacia él su atención. Significativamente se activaban menos neuronas durante la fijación memorística de la posición originaria del círculo. La intensificación de la actividad en la corteza prefrontal se relacionaba, por consiguiente, no tanto con la memoria cuanto con la atención, argumentaron Lebedev y sus colaboradores.

Pero, si la CPF solo se ocupa de seleccionar la información y no de almacenarla, ¿por qué sus lesiones originan consecuencias tan fatales para la memoria de trabajo? Estas consecuencias nefastas las pusieron sobre la mesa, ya en los años treinta, unos experimentos entonces impactantes: los monos con una lesión bilateral de la CPF son incapaces de detectar, entre dos posibles opciones, bajo qué tazón se halla la comida cuando esta se hace desaparecer de su campo visual durante tan solo dos segundos. Según supuso el equipo en torno a Lebedev, otras áreas cerebrales no pueden compensar la pérdida de la CPF. Pero eso no tiene que significar forzosamente que esta área desempeñe una función central en los recuerdos efímeros. También las deficiencias de atención podrían explicar por qué los voluntarios con lesiones de la CPF dan tan malos resultados en las tareas con reacción retardada.

Mark D'Esposito, de la Universidad de California, en Berkeley, junto con Bradley Postle y otros colaboradores, se propuso averiguar si una corteza prefrontal intacta resulta imprescindible para el mantenimiento de la información. Investigaron el cerebro de 20 voluntarios sanos mientras estos mantenían en la memoria de trabajo una serie de letras. El resultado fue que la corteza prefrontal lateral de ambos hemisferios se encontraba especialmente activa en todos los sujetos.

¿Qué hace en realidad la CPF?

En otra serie de ensayos los científicos compararon la memoria de siete pacientes, cuya corteza prefrontal se encontraba dañada a consecuencia de un ictus, con las capacidades memorísticas de 26 personas sanas que actuaron de grupo de control. Los voluntarios observaban una fila de letras en una pantalla y tenían que elegir entre memorizar una de ellas o memorizar tantas como su margen de memoria, previamente determinado, les permitiera.

La investigación puso de manifiesto que los pacientes con un daño unilateral de la CPF no mostraban rendimientos por debajo de los miembros del grupo de control. Tal resultado les sorprendió: si en los primeros experimentos se había visto que las neuronas de la CPF lateral se activaban intensamente durante los recuerdos fugaces, ¿cómo podía suceder esta contradicción? El grupo de investigadores en torno a D'Esposito dio dos posibles explicaciones. Por un lado, podía ser que los procedimientos de neuroimagen se limitaran a mostrar la coincidencia entre determinados procesos cerebrales y ciertos procesos cognitivos, y no si los primeros eran realmente imprescindibles para los segundos. Según esto, la activación de la corteza

prefrontal no sería ninguna condición necesaria para que se diera almacenamiento transitorio de información. Por otro lado, pudiera ser que la actividad de la CPF, que abarca los dos hemisferios, apoyara de alguna forma la memoria a corto plazo. El daño unilateral de dicha región cerebral no bastaría para menoscabar la capacidad memorística.

Con un método distinto, Massihullah Hamidi y sus colaboradores de la Universidad de Winsconsin-Madison llevaron a cabo una investigación, en 2008, basada en *inactivar* unas áreas cerebrales concretas con la finalidad de determinar su función. Utilizaron la estimulación magnética transcraneal (EMT), al objeto de paralizar mediante ella, de forma dirigida, ámbitos cerebrales prestablecidos. Cincuenta y cuatro voluntarios tuvieron que decidir si un círculo que aparecía en una pantalla ocupaba la misma posición que otro ya presentado. Mientras las personas que participaban en el ensayo memorizaban la posición del primer círculo, Massihullah interfirió, mediante estimulación magnética, en la mitad de los casos, una de cinco áreas escogidas del cerebro. El resultado fue que la *lesión virtual* ocasionaba, en la mayoría de los casos, un exiguo número de respuestas correctas.

Interferencia con efectos positivos

Con una excepción: cuando Hamidi y su equipo inhibieron el lóbulo temporal superior, no apareció dicho efecto, sino que, al contrario de lo esperado, se acortaron incluso los tiempos de reacción de los voluntarios y sus respuestas fueron más rápidas. El área afectada desempeña un papel en la memoria a corto plazo de la información espacial, concluyeron los investigadores. Que el tiempo de reacción acortado no incrementara la tasa de fallos puede tener la siguiente explicación: cuando se inhiben dos áreas cerebrales correlativas, la interferencia de la una puede conducir a un aumento de actividad de la otra.

A diferencia del lóbulo temporal, la corteza prefrontal dorsolateral no parece ser significativa para los recuerdos fugaces. Al menos los científicos no pudieron encontrar ninguna prueba definitiva de su papel a este respecto. Si se desactivaba esa región mediante estimulación magnética, los voluntarios respondían con menos frecuencia de forma correcta, pero el mismo efecto aparecía también cuando los investigadores interferían el giro postcentral, un área dedicada a las sensaciones táctiles y dolorosas y que no está relacionada en absoluto con la memoria de corta duración. La conclusión que sacan los investigadores es que la memoria de trabajo espacial reside predominantemente en los mismos mecanismos neuronales que la percepción espacial misma, esto es, en regiones cerebrales que se encuentran detrás de la corteza prefrontal.

En conjunto, cabe decir que un gran número de estudios parecen suscribir la hipótesis de Bradley Postle, para quien habría que dar carpetazo al modelo considerado estándar de la memoria de trabajo. Según este autor, no son unas unidades fijamente delimitadas, como el lazo fonológico, las que almacenan los recuerdos pasajeros. En su lugar, según el tipo concreto de información, distintas regiones cerebrales estarían a cargo de las tareas de memorización. Además, las áreas cerebrales que habrían tomado parte en la percepción o en la representación de una determinada información contribuirían también a mantenerla presente en la memoria de trabajo. La corteza prefrontal no desempeña a este respecto ninguna labor de almacenaje, sino que actúa como una especie de filtro. Por lo tanto, las unidades de memoria tales como el lazo fonológico *existirían* solo en tanto actividad simultánea de áreas cerebrales anteriores y posteriores.

Las ideas de Postle han recibido nuevos bríos gracias a Mark D'Esposito, de la Universidad de California, quien, tras valorar un considerable número de trabajos individuales, en 2007 llegó a la conclusión de que la memoria de trabajo surge cuando diferentes regiones cerebrales, como la corteza prefrontal, pero también las áreas que participan en la percepción, colaboran entre sí. La memoria de trabajo no se puede adscribir por consiguiente a una única región cerebral.

¿Están contados, por tanto, los días del modelo estándar de la memoria de trabajo? Todavía no ha sido dicha la última palabra. Hay también investigaciones de reciente factura que apoyan el modelo clásico. Con todo, al menos la idea convencional de una memoria fija y ordenada aparece, desde la perspectiva actual, como anticuada. Han quedado atrás los años en los que se imaginaba al cerebro como un ordenador con un procesador central. Es más probable que este trabaje por medio de redes neuronales flexibles que se coordinan temporalmente para llevar a cabo determinadas funciones mentales.

Christian Wolf *es doctor en filosofía y periodista científico.*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

WORKING MEMORY AS AN EMERGENT PROPERTY OF THE MIND AND BRAIN. B.R.Postle en *Neuroscience*, vol. 139, n.º 1, págs. 23-38, 2006.

EVALUATING FRONTAL AND PARIETAL CONTRIBUTIONS TO SPATIAL WORKING MEMORY WITH REPETITIVE TRANSCRANIAL MAGNETIC STIMULATION. M. Hamidi et al. en *Brain Research*, vol. 1230, págs. 202-210, 2008.

El necesario escepticismo sobre los escáneres cerebrales

Las reproducciones en color nos han persuadido de que el cerebro funciona como una máquina modular. Tal simplificación es excesiva

MICHAEL SHERMER

RESUMEN

Imágenes del cerebro engañosas

1 La ciencia recurre a menudo a metáforas para comprender fenómenos difíciles o contrarios a la intuición.

2 La metáfora que asimila el cerebro a una navaja multiusos (una colección de módulos especializados diseñados para resolver problemas concretos) ha resultado reforzada por las técnicas de escáner cerebral.

3 Sin embargo, esos escáneres cerebrales resultan falaces en cierto número de niveles, y han inducido a exagerar la ubicación de la función cerebral.

Artículo publicado en *Mente y cerebro* n.º 44

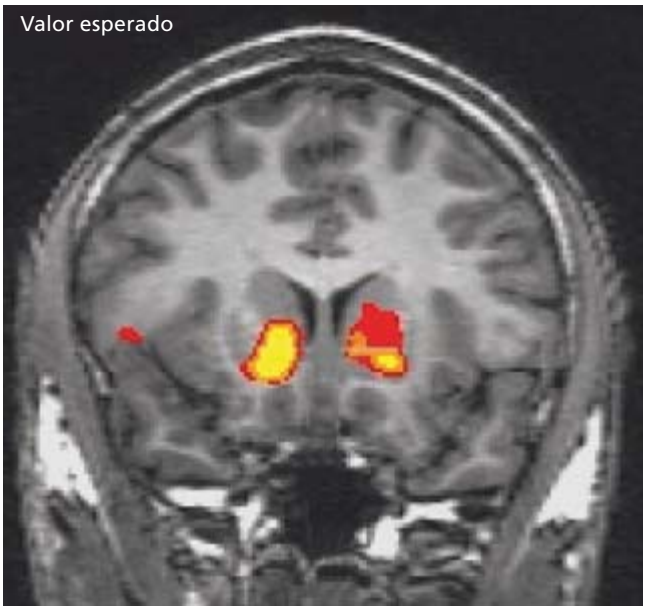
Desde hace algunos siglos, los científicos, en sus empeños por comprender los orígenes de la increíble capacidad de procesamiento que se aloja en nuestros cráneos, han recurrido a cierto número de metáforas inspiradas en las tecnologías habituales en su tiempo. En consecuencia, el cerebro ha sido concebido como una máquina hidráulica (siglo XVIII), como una calculadora mecánica (s. XIX), o como una computadora electrónica (s. XX).

Ahora, en los albores del siglo XXI, se dispone de otra metáfora, inspirada en las posibilidades de la tecnología actual: se trata, esta vez, de pintorescas imágenes procedentes de escáneres del cerebro. En la psicología evolutiva, por ejemplo, el cerebro ha sido conceptualizado como una navaja multiusos, dotado de una colección de módulos especializados que han evolucionado para resolver problemas concretos de nuestra historia evolutiva; entre ellos, el lenguaje, para la comunicación; el reconocimiento facial, para distinguir amigos de enemigos; la detección de tramposos, para poner coto a los *pasotas*, la asunción de riesgos, para elevar la probabilidad de éxito individual o grupal, e incluso Dios para explicar el mundo y hallar felicidad individual en la esperanza de una vida ultraterrena. Muchos neurocientíficos han recurrido a la metáfora modular para describir regiones determinadas del cerebro «correspondientes a X», siendo X cualquier tarea que se le proponga a los probandos mientras una máquina le hace un escáner a sus cerebros. Entre tales tareas podrían contarse la selección de los emblemas comerciales que prefieran (Coca o Pepsi, sea por caso) o de los candidatos políticos a quienes votarían (conservadores o progresistas).

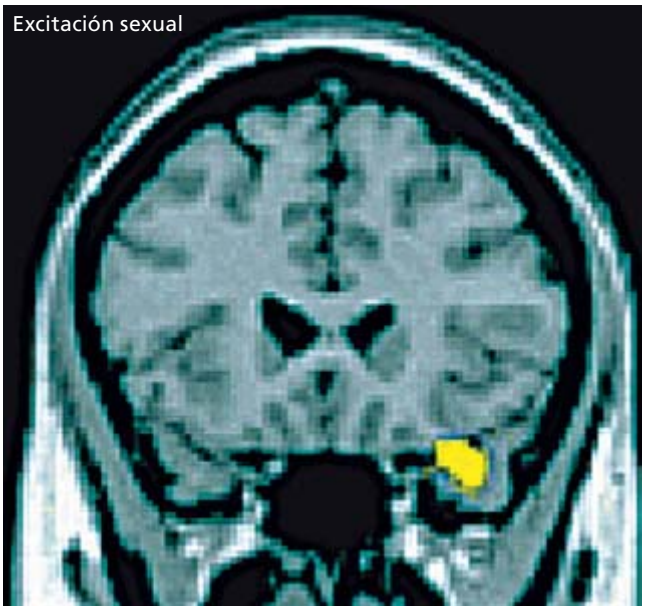
Metáforas como estas han sido utilizadas a menudo para facilitar la comprensión o explicación de procesos complejos, pero tal práctica entraña necesariamente una simplificación extrema de las intrincadas y sutiles realidades del mundo físico. Pero es que, además, el papel de esas manchas de color que vemos en las imágenes del cerebro no es tan claro como se nos ha inducido a creer. «No existen [en el cerebro] módulos encapsulados en él, que meramente envíen información a un procesador central», declara Patricia S. Churchland, de la Universidad

TAPIZ DE COLORES
Las imágenes de cerebros salpicadas con regiones coloreadas resultan engañosas, ya que hacen pensar en bloques de procesamiento bien definidos

GETTY IMAGES



B. KNUTSON ET AL., EN *JOURNAL OF NEUROSCIENCE*, VOL. 25, N.º 19, 11 DE MAYO, 2005



M. BEAUREGARD ET AL., EN *JOURNAL OF NEUROSCIENCE*, VOL. 21, N.º 18, 15 DE SEPT., 2001

de California en San Diego. «Existen, sí, áreas de especialización y, tal vez, redes... pero estas no siempre están dedicadas a tareas concretas.»

La formación de imágenes mediante resonancia magnética funcional y otras técnicas ha facilitado la adquisición de un conocimiento más completo y de una comprensión más plena, pero al confiar excesivamente en ellas, se ha trazado un esbozo simplista del funcionamiento del cerebro, que, en ocasiones, conduce a errores. Incluso esta misma revista, que se centra en la explicación del cerebro y de la conducta, recurre a menudo a esas metáforas simplistas.

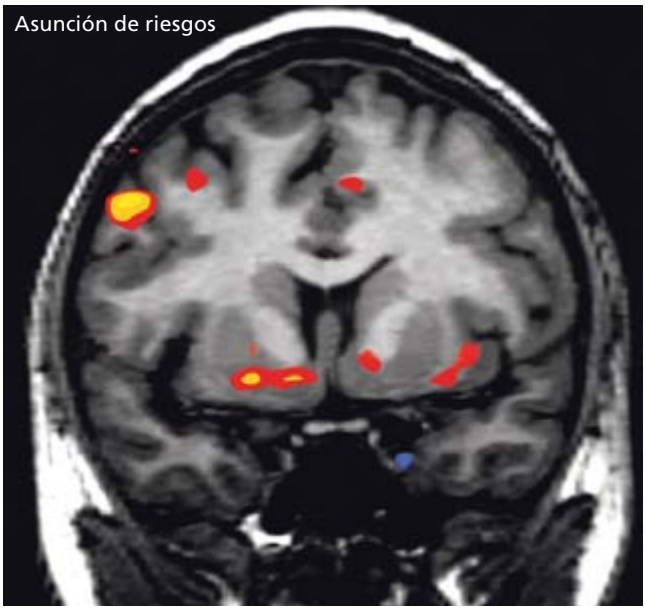
Permítaseme, pues, explicar lo que toda esta imaginería puede —y lo que no puede— mostrarnos en realidad, examinando más de cerca las capacidades y el funcionamiento de la imaginología por resonancia magnética funcional (IRMf), que es, posiblemente, la más aclamada de las técnicas de formación de imágenes del cerebro. Tras la lectura de este artículo se podrán valorar con mayor ecuanimidad y sentido crítico los futuros titulares que sobre estudios del cerebro podamos encontrar en los medios de comunicación. He aquí cinco puntos débiles de los escáneres cerebrales:

Las imágenes de cerebros salpicadas con manchas delimitadas sugieren bloques de procesamiento bien definidos. En realidad, la actividad neuronal puede hallarse distribuida en más de una red difusa

1 Un ambiente antinatural para los procesos cognitivos

Visité el laboratorio del neurocientífico Russell Poldrack en la Universidad de California en Los Ángeles, y pude hacerme escanear el cerebro en su equipo de IRM. Uno de esos escáneres tiene típicamente una masa de unas 12 toneladas y cuesta un par de millones de euros, sin contar la instalación, mantenimiento y formación del personal, lo que normalmente subirá la cuenta en otro millón. Desde el primer momento me di cuenta de lo muy antinatural del ambiente de esa especie de sarcófago tubular. De hecho, tuve que abandonar el experimento antes incluso de empezar. De repente me sobrevino una aguda claustrofobia, algo que nunca había experimentado con anterioridad. Mi caso no es único. Poldrack me explica que alrededor del 20 por ciento de los sujetos se ven afectados de forma similar. Dado que no todo el mundo es capaz de conservar la tranquilidad mientras le estrujan dentro del tubo, los estudios de IRMf están afligidos de sesgos de muestreo: la muestra examinada no puede ser completamente aleatoria, y no cabe afirmar que represente equitativamente a todos los cerebros.

Antes del experimento, la cabeza del sujeto —ya apretujada en el estrecho tubo del escáner— es firmemente encajada, mediante cuñas de espuma, en el interior de la «jaula» —nombre coloquial del alojamiento de la bobina de examen cefálico— para impedir que la cabeza se mueva, pues las imágenes podrían salir borrosas. El escáner IRM toma una «instantánea» del



B. KNUTSON ET AL., EN *NEUROREPORT*, VOL. 19, N.º 5, 26 DE MARZO, 2008

GALERÍA DEL PENSAMIENTO

Los investigadores captan con ayuda de la imaginología por resonancia magnética funcional (IRMf) cómo varían las concentraciones de oxígeno en sangre en determinadas zonas cerebrales según el estado mental del sujeto. La coloración de regiones bien definidas que muestran muchas imágenes de cerebros escaneados aparece posteriormente en el ordenador.

NO APTO PARA CLAUSTROFÓBICOS

Muchos sujetos, entre ellos el autor, no logran soportar durante largo tiempo el claustrofóbico ambiente de una máquina IRM, lo que imposibilita que estos estudios representen equitativamente a todos los cerebros.

CORTESÍA DEL AUTOR

cerebro cada dos segundos, mientras el sujeto toma decisiones mediante un teclado auxiliar, o contempla imágenes que le son proyectadas en unas antiparras provistas de pequeñas pantallas. Así que cuando lea usted descripciones *divulgativas* de sujetos a quienes se les escaneó el cerebro mientras iban de compras, tenga presente que no estaban paseando por un centro comercial con un artefacto plantado en la cabeza. Ni mucho menos.

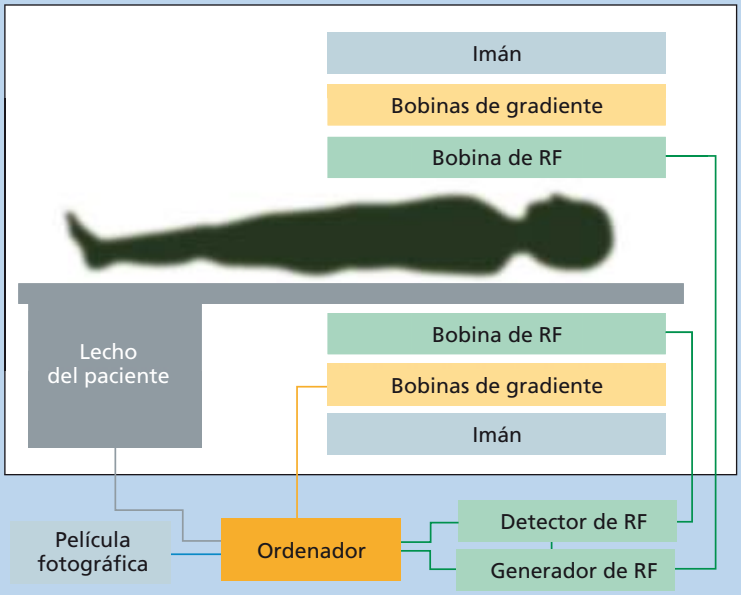
2 Los escáneres constituyen medidas indirectas de actividad cerebral

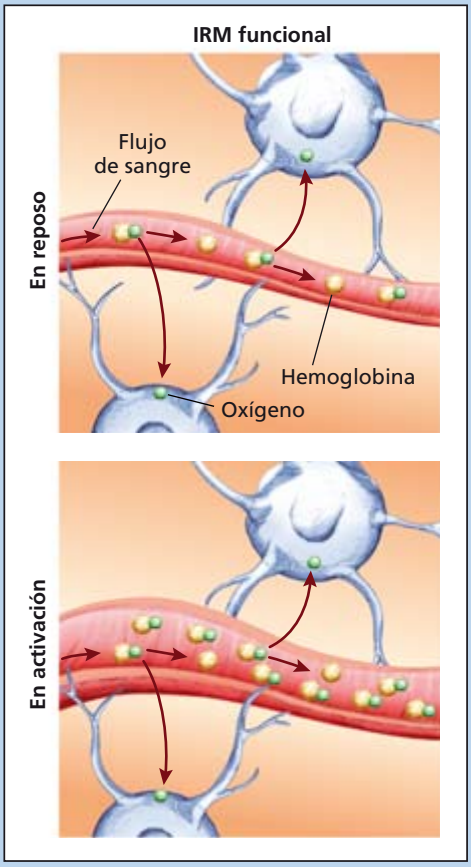
Leemos a menudo descripciones populares de investigaciones IRMf, en las que se explica cómo se *enciende* el cerebro cuando piensa en dinero, o en sexo, o en Dios, o en lo que sea. He aquí lo que realmente hace la máquina IRM cuando uno piensa. El escáner es un gran cilindro electromagnético que utiliza materiales superconductores, refrigerados por helio, capaces de generar potentes campos magnéticos. La intensidad de estos campos magnéticos es de 25.000 a 80.000 veces mayor que la del campo magnético terrestre. Son tan potentes que los sujetos han de quitarse todos los objetos metálicos antes de entrar en la zona apantallada (se han producido accidentes mortales al salir volando objetos metálicos atraídos por una máquina IRM). Los pacientes con marcapasos o implantes metálicos no pueden ni siquiera entrar en la sala, que está a su vez pesadamente reforzada con acero y utiliza técnicas de insonorización para amortiguar el fuerte ruido —incluso hace temblar los huesos— que se produce cuando los imanes obran su magia.

Cuando una persona se encuentra en el interior del tubo, algunos de los átomos de sus tejidos se alinean con el campo magnético. Esta alineación tiene lugar en uno de cada millón de átomos, aproximadamente, pero tal número es suficiente, porque nuestro cuerpo cuenta con alrededor de 7×10^{27} átomos; ello supone unos seis mil trillones (6×10^{21}) de átomos en un ortoedro de $2 \times 2 \times 5$ milímetros de tejido, más

Lo que «ve» una IRM

Las imágenes en una máquina de imaginología por resonancia magnética (IRM) se obtienen mediante una serie de imanes, un generador de radiofrecuencia (RF) y un detector. La IRM funcional detecta las variaciones de concentración de oxígeno, la cual aumenta en las inmediaciones de las neuronas activas, ya que estas consumen más oxígeno que cuando se hallan en reposo (*derecha*).





que suficientes para que el escáner pueda leerlos. Los protones de los núcleos de esos átomos tienen espín, como si rotasen sobre sí mismos, y ese giro tiene precesión (el eje de rotación va barriendo un cono). La frecuencia de la precesión del protón (frecuencia de resonancia) depende de la intensidad del campo magnético, el cual varía en el sentido longitudinal del tubo. Este campo es algo más intenso en el alojamiento de la cabeza, y por ello, la frecuencia de resonancia de los protones que se encuentren allí varía ligeramente. Para crear una imagen, la máquina emite un cierto impulso de radiofrecuencia, que excita a los protones a adoptar la frecuencia de resonancia inducida por el campo magnético. Esta excitación, de hecho, desvía lateralmente la dirección de su alineamiento. Con el tiempo (milésimas de segundo) estos protones retornan a su alineación con el campo magnético principal, y en el proceso emiten cierta energía. La máquina mide esta energía para crear imágenes.

3 El coloreado exagera los efectos en el cerebro

Las figuras de cerebros salpicados con regiones coloreadas, nítidamente definidas, son sumamente engañosas, porque hacen pensar en bloques de procesamiento bien definidos (metáfora modular), cuando en realidad la actividad neuronal puede hallarse distribuida en más de una red difusa. He aquí cómo la IRMf genera datos que pueden conducir a esta artificial modularidad. Como principio básico existe acuerdo en que las modificaciones de flujo sanguíneo y las concentraciones de oxígeno en determinadas zonas cerebrales son indicativas de una mayor actividad neuronal. Cuando las neuronas se encuentran activas consumen más oxígeno, que se extrae de la hemoglobina de los hematíes de capilares cercanos; el cerebro responde a la mayor necesidad de oxígeno enviando más, y por razones que todavía no se conocen plenamente, envía más del necesario. Existe un retraso de aproximadamente cinco segundos entre la actividad neuronal y la modificación de flujo sanguíneo, lo que ocasiona diferencias en las concentraciones relativas de hemoglobina oxigenada en dichas áreas cerebrales activas. Dado que el hierro de la molécula de hemoglobina es sensible al campo magnético, existen diferencias magnéticas medibles entre los hematíes portadores de oxígeno y los desprovistos de él, y el escáner IRM mide estas diferencias.

En un escáner cerebral, la imagen que se muestra no representa el cerebro de nadie concreto. Se trata de una computación estadística de todo un conjunto de probandos

El coloreado es artificial, y el proceso de coloreado de las regiones más engañoso todavía, como explica Churchland: «Las diferencias de actividad son diminutas. Se puede hacer que tales diferencias parezcan enormes coloreándolas de rojo y eliminando todo lo demás, por lo que la impresión que dan es exagerada». La elección de lo que se ha de resaltar también es engañosa. «Tomemos el núcleo cingulado, una región implicada en los conflictos», añade Churchland. «Es posible provocar en él una respuesta presentando a los probandos una fotografía de, sea por caso, Hilary Clinton. Pero el núcleo cingulado efectúa también otras 57 cosas más.»

Finalmente, cuando le pregunto sobre la exposición de los probandos instalados en el escáner a diversos estímulos, Churchland exclama, un tanto exasperada: «Lo que pasa es que la actividad del cerebro apenas está inducida por estímulos, sino que es espontánea, y no sabemos la causa de tanta actividad, ni lo que se está haciendo». Dicho de otro modo, muchas regiones cerebrales se encuentran incesantemente activas durante diferentes tareas de procesamiento, y su adecuada separación constituye un problema que exige un diseño experimental cuidadoso.

4 Las imágenes cerebrales son compilaciones estadísticas

Durante un experimento dado, el escáner toma instantáneas de la actividad cerebral —una serie de rápidos fogonazos— cada dos segundos solamente, y ello genera centenares o millares de imágenes en cada período de escáner (que puede durar desde 15 minutos hasta un par de horas). Concluido el experimento, los investigadores efectúan correcciones para tener en cuenta movimientos de la cabeza y pequeñas diferencias en el tamaño cerebral y en la ubicación de estructuras en los diferentes cerebros. Las imágenes individuales son alineadas, y los datos, combinados y promediados para cada sujeto del

experimento. Se valen además de programas informáticos de tratamiento estadístico de datos para convertir en imágenes los datos en rama así como para corregir otras posibles variables que intervengan, tales como tareas cognitivas que produzcan en el cerebro cambios de actividad neuronal más rápidamente que las variaciones en flujo sanguíneo realmente medidas por el IRM.

Tenga presente todo lo explicado la próxima vez que vea usted uno de esos vistosos escáneres cerebrales en los que una flecha apunta a un cierto sitio que dice: «Su cerebro ocupándose de X». Normalmente, esa imagen no representa el cerebro de nadie individual. Se trata de un cálculo estadístico basado en todo el colectivo de probandos, traducido mediante un coloreado arbitrario para destacar los lugares donde se produce una respuesta consistente ante una tarea dada o a una determinada situación experimental.

5 Las áreas cerebrales se activan por razones varias

La interpretación de escáneres IRMf constituye tanto un arte como una ciencia, admite Poldrack. «Resulta tentador echar una mirada a uno de esos puntos y afirmar, "Aquí es donde ocurre X en su cerebro", cuando, de hecho, tal región podría encenderse al participar en toda suerte de tareas», explica. «Tomemos la corteza prefrontal derecha, que se ilumina casi siempre que se realiza una tarea difícil. Una posibilidad consiste en pensar en términos de redes, no de módulos. Si estamos pensando en asuntos de dinero, se crea una red compuesta por varias áreas, que se comunican entre sí de un modo peculiar. Así pues, la corteza prefrontal puede participar en muchas tareas diferentes. Pero en comunicación con otras redes cerebrales, se activa cuando interviene en una tarea particular, como la de pensar en dinero.» La individualización y separación de estas dificultades exige la realización de comparaciones relativas en todo un espectro de tareas. Ciertos experimentos funcionan especialmente bien con IRMf porque las decisiones proporcionan contrastes entre tareas, y proporcionan a los neurocientíficos elementos de comparación.

¿Qué decir de las investigaciones que revelan diferencias entre las porciones racionales y emotivas del cerebro? ¿Se originan las emociones en las regiones más profundas y antiguas del cerebro, y la *autopista racional* en las regiones corticales? «Sí, existen formas racionales y formas emotivas de pensar», nos dice Poldrack. Pero «resulta que interactúan muchísimo entre sí». La amígdala, una región típicamente asociada con el procesamiento de las respuestas de temor, es activada también por la excitación sexual y por emociones positivas: «Si yo le sitúo en un estado de temor, su amígdala se ilumina. Pero eso no significa que cada vez que su amígdala se ilumine esté usted pasando miedo. Cada área cerebral se activa en muchísimos estados diferentes. Sencillamente, carecemos de datos que nos digan cuán selectivamente activa es un área determinada».

Redes neuronales

Resulta posible localizar y agavillar en unidades *módulo-morfas* un cierto número de redes neuronales interconectadas, pero en la mayoría de los casos quedan mejor descritas diciendo que se encuentran difusas sobre, debajo, o a través de los surcos cerebrales. La metáfora de inteligencia distribuida, tan manida para aludir a la potencia de la World Wide Web, se ajusta mejor a la distribución reticular de tareas en el cerebro que la metáfora modular.

Existen, desde luego, regiones que se especializan en ciertos tipos de procesamiento, como la corteza visual de la región occipital del encéfalo, o el área de Broca, vinculada al lenguaje, situada en el lóbulo frontal izquierdo. Y hablando sin precisión, la razón y la racionalidad residen en las áreas corticales, mientras que la emoción y la irracionalidad se experimentan en el sistema límbico.

No obstante —así lo creen en la actualidad muchos neurocientíficos— la metáfora de las redes neuronales es preferible a la de los módulos mentales. Esta última nos fuerza a considerar al cerebro como un batiburrillo de órganos encapsulados, especializados para una función y no para otra, mientras que la primera refleja con mayor precisión lo que la neurociencia moderna cree que en verdad acontece durante la cognición. Las tecnologías de escáner cerebral, como la IRMf continuarán generando gran copia de datos para nuestras teorías metafóricas, y mientras nuestras redes de escepticismo se mantengan extendidas, podremos cartografiar mejor las redes neuronales y las funciones que las acompañan en el paisaje de nuestros comportamientos.

Michael Shermer es editor de la revista científica Skeptic *y columnista de* Scientific American.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

HOW THE MIND WORKS. Steven Pinker. W. W. Norton, 1999.

THE MIND DOESN'T WORK THAT WAY: THE SCOPE AND LIMITS OF COMPUTATIONAL PSYCHOLOGY. Jerry Fodor, MIT Press, 2001.

THE NEW PHRENOLOGY: THE LIMITS OF LOCALIZING COGNITIVE PROCESSES IN THE BRAIN. William Uttal. MIT Press, 2001.

THE QUEST FOR CONSCIOUSNESS: A NEUROBIOLOGICAL APPROACH. Christof Koch. Roberts & Company, 2004.

KLUGE: THE HAPHAZARD CONSTRUCTION OF THE HUMAN MIND. Gary Markus. Houghton Mifflin, 2008.

Nueva serie
«NEUROLOGÍA DEL HABLA»

MENTE y CEREBRO

Revista de psicología y neurociencias

El n.º 52 a la venta

Claves de la MOTIVACIÓN

- Las dos caras del estrés
- Epilepsia resistente a los fármacos
- La zona gris de la violencia
- La empatía
- Interpretación errónea de las estadísticas
- Entrevista a Philip Zimbardo

Y más...

Para suscribirse:

www.investigacionyciencia.es

Teléfono: 934 143 344

administracion@investigacionyciencia.es

Prensa Científica, S.A.

Nuevo número de la colección TEMAS
A LA VENTA

La dieta humana:
biología y cultura

EVOLUCIÓN
Incidencia de la dieta en la hominización

HISTORIA
Los orígenes de la dieta moderna

NUTRIGENÓMICA
El camino hacia una dietética personalizada

SALUD
Causas metabólicas y psicosociales de la obesidad

También puede adquirirlo en
www.investigacionyciencia.es

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA